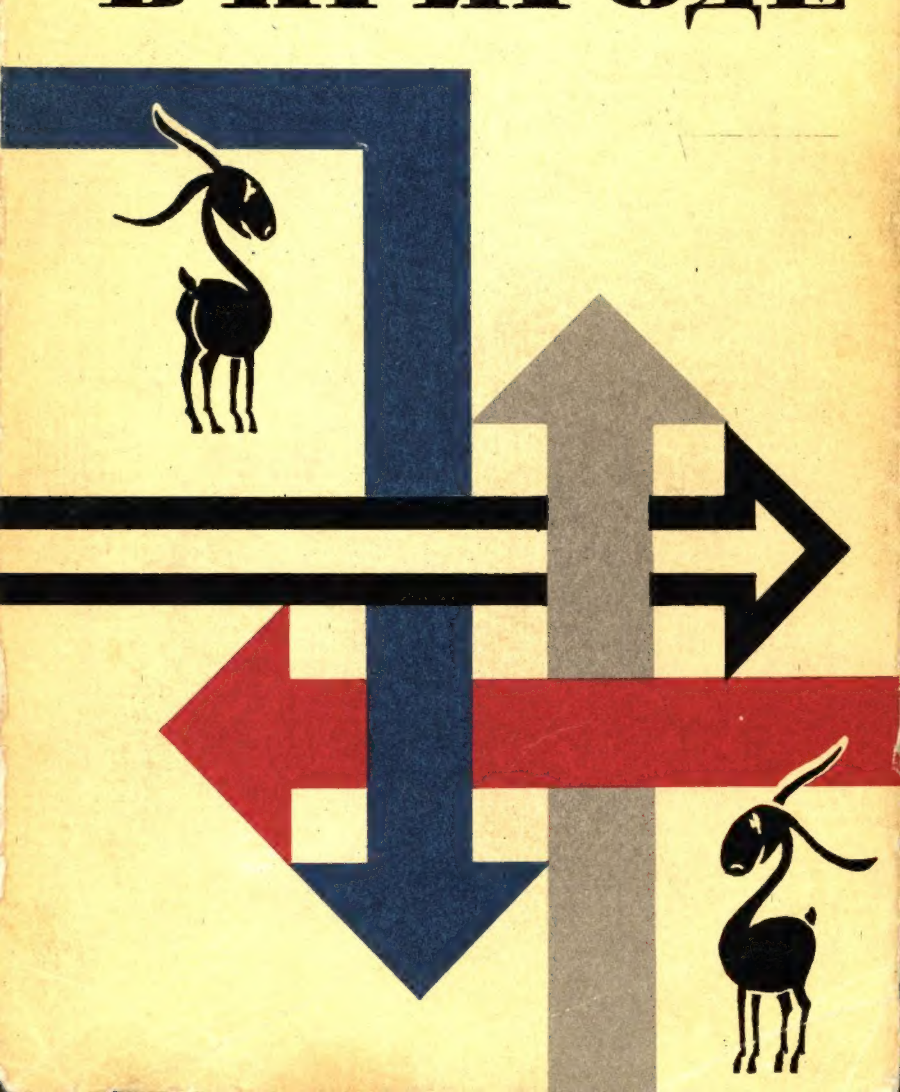
В. ГРИГОРЬЕВ • Г. МЯКИШЕВ

СИЛЫ В ПРИРОДЕ



В. И. ГРИГОРЬЕВ, Г. Я. МЯКИШЕВ

СИЛЫ В ПРИРОДЕ

ИЗДАНИЕ ПЯТОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1977

530.1
Г 83
УДК 530.1

Г $\frac{20402\text{-}050}{053(02)\text{-}77}$ 127-77

ОТ АВТОРОВ

Бесконечно сложной кажется на первый взгляд картина взаимодействий в природе. Однако все их многообразие сводится в конечном счете к очень небольшому числу фундаментальных сил.

Что это за фундаментальные силы? Сколько их? Каким образом сводится к ним вся сложная картина связей в окружающем нас мире? Об этом мы и рассказываем в книге.

Первое издание этой книги вышло почти полтора десятилетия назад. За это время основные представления о фундаментальных взаимодействиях оставались, в целом, неизменными. Однако появилось и много нового. И дело не только в том, что открыты новые частицы, новые эффекты, новые классы физических и астрофизических объектов — и каждое такое открытие добавляет важные новые штрихи к общей картине проявлений фундаментальных взаимодействий. По-видимому, уже можно говорить о явственно проступающей тенденции внести в эту картину принципиальные изменения: единым образом рассматривать два (из четырех) типа фундаментальных взаимодействий — электромагнитные и слабые.

Наиболее важные новые достижения физики учтены в настоящем, пятом издании книги.

Писать эту книгу было интересно, хотя отдельные места давались не без труда. Вероятно, и чтение ее потребует временами некоторых усилий.

Глава первая

ВМЕСТО ВВЕДЕНИЯ

Слова, слова, слова.

В. Шекспир, «Гамлет»



1. *«Сила» в повседневной речи.*

2. *Сила в механике.*

3. *Всегда ли взаимодействие можно характеризовать силами?*

4. *Единство сил природы.*

1.

От силы страсти до силы пара

Слову «сила» принадлежит своеобразный рекорд. Почти в любом толковом словаре объяснению этого слова отводится едва ли не самое большое место. Так, в словаре В. Даля можно прочесть, что сила — это «источник, начало, основная (неведомая) причина всякого действия, движенья, стремленья, побужденья, всякой вещественной перемены в пространстве, или: начало изменяемости мировых явлений». Однако этим пространным описанием «суть дела» не исчерпывается. Как вам понравится еще одно определение силы у того же В. Даля: «*Сила* есть отвлеченное понятие общего свойства вещества, тел, ничего не объясняющее, а собирающее только все явления под одно общее понятие и название».

Разнообразие смыслов, в которых употребляется слово «сила», поистине удивительно: здесь физическая сила и сила воли, лошадиная сила и сила убеждения, стихийные силы и сила страсти, сила пара и т. д. и т. п. А бесчисленные пословицы, начиная от ясного утверждения, что «сила солому ломит», и кончая несколько загадочным уверением, что «не в том сила, что кобыла сива, а в том, что не везет», которую опять-таки можно найти у Даля.



Но, может быть, словарь В. Даля просто устарел. Обратимся, например, к словарю русского языка, составленному С. И. Ожеговым в 1953 г. Здесь мы не найдем вообще единого определения этого слова, зато увидим сразу десять различных

толкований. И вряд ли у кого-нибудь возникнет уверенность, что нельзя добавить сюда еще столько же, хотя охват здесь весьма широк: от «центробежной силы» и «силы привычки» до «по силе возможности».

«Владеет любовь электрической силой»

Естественно, и в поэзии слово «сила» используется крайне разнообразно. Это относится к творениям как старых поэтов, так и современных. Мы ограничимся несколькими примерами, ибо любой читатель может без труда удвоить или утроить это число.

Орел бьет сокола, а сокол бьет гусей.
Страшатся щуки крокодила;
От тигра гибнет волк, а кошка ест мышей.
Всегда имеет верх над слабостию сила.

А. Пушкин, «Нравоучительные четверостишия», «Сила и слабость».

Или еще:

Сила силе доказала,
Сила силе не ровня.
Есть металл прочней металла,
Есть огонь страшней огня.

А. Твардовский, «Василий Теркин».

Сила может быть употреблена в поэзии почти что в научном смысле:

Зачем надевают кольцо золотое
На палец, когда обручаются двое? —
Меня любопытная дева спросила.
Не став пред вопросом в тупик,
Ответил я так собеседнице милой:
— Владеет любовь электрической силой,
А золото — проводник!

Р. Бернс, «Золотое кольцо».

Мы далеки от мысли попытаться объяснить, почему слово «сила» получило так много различных значений, ибо «нельзя объять необъятное», особенно оставаясь в рамках естественных наук.

Те «силы в природе», о которых говорится в названии этой книги, являются предметом изучения в физике.

Тартарен и ускоритель

Физика... Недаром она стоит в первом ряду точных наук. Вы наверное помните ту славу, которую принесла знаменитому тарасконцу его изумительная меткость при стрельбе по фуражкам. Но даже Тартарен почувствовал бы, по-видимому, смущение, если бы ему предложили выпустить пулю, которая, пролетев несколько десятков тысяч километров, должна была бы попасть в копейку. А ведь подобная задача решена физиками в гигантских ускорителях элементарных частиц.

Движение огромных космических тел, траектории ракет, процессы внутри атомов, распад и взаимные превращения элементарных частиц — целый океан явлений описывается, и описывается количественно с изумительной точностью, законами физики.

Впрочем, при всеобщем обязательном образовании каждый имеет некоторое представление об этой науке. Физика может показаться какой угодно, даже скучной для некоторых, но никто не смеет упрекнуть ее в неточности, когда дело касается определения основных понятий физики. Естественно думать, что именно в физике понятие силы может быть однозначно и точно определено. Физика в значительной степени оправдывает эти надежды, но, как мы увидим в дальнейшем, дело обстоит далеко не так просто.

Давайте посмотрим сначала, как это понятие вошло в науку и какие превращения испытало в дальнейшем. Это слово не было придумано заново и не было взято из мертвого языка, как это произошло с большинством научных терминов: электрон, энтропия, интерференция и т. д. Оно вошло в науку из живого языка и поэтому далеко не сразу и отнюдь не без труда очистилось от оттенков, присущих обыденному его употреблению.

Что понятнее: падение камня или движение кошки

Ощущения, которые появляются у человека при подъеме груза, при приведении в движение окружающих тел и своего собственного тела, легли в основу понимания силы в механике. Но, «поскольку каждому сознательному применению человеком силы предшествует волевой акт, то позади физического понятия силы

искали нечто более глубокое, метафизическое, какое-то присущее телам стремление; в случае, например, силы тяжести — стремление соединиться с себе подобным. Нам трудно понять эту точку зрения». (Лауэ, «История физики».) Подобно тому,— рассуждали ученые древности,— как утомленный путник ускоряет шаги по мере приближения к дому, падающий камень начинает двигаться все быстрее и быстрее, приближаясь к матери-земле. Как это ни странно для нас, движение живых организмов, например кошки, казалось в те времена гораздо более простым и понятным, чем падение камня.

2.

Каким видел мир Ньютон

Только Галилею и Ньютону удалось целиком освободить понятие силы от «стремлений», «желаний» и других подобного рода черт, присущих одушевленной материи. Классическая механика Галилея и Ньютона стала колыбелью научного понимания слова «сила».

На могиле творца классической механики Ньютона высечены слова:

Здесь покоится
Сэр Исаак Ньютон,
Который почти божественной силой своего ума
Впервые объяснил
Помощью своего математического метода
Движения и формы планет,
Пути комет, приливы и отливы океана.
Он первый исследовал разнообразие световых лучей
И проистекающие отсюда особенности цветов,
Каких до того времени никто даже не подозревал.
Прилежный, проницательный и верный истолкователь

Природы, древностей и священного писания,
Он прославил в своем учении Всемогущего
Творца.
Требуемую Евангелием простоту он доказал своей
жизнью.
Пусть смертные радуются, что в их среде
Жило такое украшение человеческого рода.
Родился 25 декабря 1642 г.
Умер 20 марта 1727 г.

Не только современников, но и многие поколения ученых до настоящего времени поражала и продолжает поражать величественная и цельная картина мира, которая была создана на основе трудов Ньютона.

Согласно Ньютону весь мир состоит из «твердых, весомых, непроницаемых, подвижных частиц». Эти «первичные частицы абсолютно тверды: они неизмеримо более тверды, чем тела, которые из них состоят; настолько тверды, что они никогда не изнашиваются и не разбиваются вдребезги». Отличаются друг от друга частицы главным образом количественными характеристиками. Все богатство, все качественное многообразие мира — это результат различий в движении частиц. Основным в этой картине мира является движение. Внутренняя сущность частиц материи остается на втором плане: главное — *как* эти частицы движутся.

Законы движения Ньютона

Основание для такой единой картины мира — во всеобъемлющем характере открытых Ньютоном законов движения тел, которым он придал строгую математическую форму. Этим законам с удивительной точностью подчиняются как громадные небесные тела, так и мельчайшие песчинки, гонимые ветром. И даже ветер — движение невидимых глазом частиц воздуха — подчинен тем же законам.

Центральная идея законов движения Ньютона такова:

Изменение состояния движения (т. е. скорости) тел вызывается взаимным действием их друг на друга.

Не является ли это само собой разумеющимся? Далеко нет. Ньютону, вслед за Галилеем, удалось окончательно развеять одно из глубочайших заблуждений человечества о законах движения тел. Начиная с Аристотеля, на протяжении почти двадцати веков все были убеждены, что движение с постоянной скоростью нуждается для своего поддержания в воздействии извне, в некоторой активной причине. Без такой поддержки тело обязательно остановится.

Это, казалось бы, находит подтверждение в нашем повседневном опыте. Например, автомобиль с выключенным двигателем останавливается и на совершенно горизонтальной дороге. При прочих равных условиях скорость автомобиля тем больше, чем бо́льшую мощность развивает двигатель. То же самое можно сказать о лодке, велосипеде, пароходе и т. д. Вот почему даже в наше время можно встретить людей, которые смотрят на движение так же, как Аристотель, впрочем не отдавая себе в этом отчета.

В действительности же изолированное тело, тело, которое не взаимодействует ни с чем другим, движется всегда с постоянной скоростью. Часто говорят, что тело движется по инерции. Только воздействие со стороны другого тела способно изменить его скорость. Прилагать усилия, чтобы поддерживать скорость постоянной, нужно только потому, что в обычных условиях всегда существует сопротивление движению со стороны земли, воздуха или воды. Имеется, как говорят, трение. Если бы его не было, скорость автомобиля не уменьшалась бы и при выключенном двигателе.

Этого никак не мог понять, например, тупой и болтливый полковник Краус фон Циллергут, у которого бравый солдат Швейк украл пинчера. «Когда весь бензин вышел,— говорил полковник,— автомобиль принужден был остановиться. Это я сам вчера видел. И после этого еще болтают об инерции, господа. Не едет, стоит, с места не трогается. Нет бензина. Ну, не смешно ли?»

Самое замечательное в законах движения Ньютона — это их точная количественная форма. Мы можем не только говорить о некотором взаимодей-

ствии тел, мы можем это взаимодействие измерять. Количественная мера воздействия тел друг на друга называется в механике силой.

Что общего между мускульной силой и тяготением

Но ведь воздействия на данное тело могут быть самыми разнообразными. Что общего, казалось бы, между силой притяжения Земли к Солнцу и силой, которая, преодолевая тяготение, заставляет двигаться ракету? Или между этими двумя силами и обычной мускульной силой? Ведь они совершенно различны по природе. За ними скрываются разные явления. Можно ли говорить о них, как о чем-то физически родственном? Да, отвечает механика Ньютона, можно. И здесь, в механике, не более как обобщен повседневный опыт каждого из нас.

Когда человек не может поднять тяжелую вещь, он говорит: «не хватает сил». При этом в сущности происходит сравнение двух, совершенно разных по своей природе сил: мускульной силы и силы, с которой Земля притягивает этот предмет. Но если вы подняли тяжелый предмет и держите его на весу, то ничто не мешает вам утверждать, что мускульная сила ваших рук по величине равна силе тяжести.

Последнее утверждение по существу и является определением равенства сил в механике. Две силы, независимо от их природы, считаются равными и



противоположно направленными, если их одновременное воздействие на тело не меняет его скорости. Тем самым открывается возможность для сравнения сил и, если одна из них произвольно выбирается в качестве эталона, для измерения сил.

Паниковский и инерция

Обратите внимание: главное в нашем определении силы — это связь с движением. Если тело неподвижно, действующие на него силы уравновешивают друг друга. Если же силы не уравновешиваются, то в этом и только в этом случае меняется состояние движения тела. Тело получает ускорение, величина которого прямо пропорциональна, согласно законам движения Ньютона, *величине силы*, но совершенно *не зависит от происхождения этой силы*. Примеров здесь необозримое количество. Возьмем наудачу если не самый поучительный, то во всяком случае и не самый скучный: эпизод похищения двухпудовых гирь, описанный в «Золотом теленке» И. Ильфа и Е. Петрова. «Паниковский нес свою долю обеими руками, выпятив живот и радостно пыхтя... Иногда он никак не мог повернуть за угол, потому что гиря по инерции продолжала тащить его вперед. Тогда Балаганов свободной рукой придерживал Паниковского за шиворот и придавал его телу нужное направление».

В данном случае внешнее воздействие со стороны Балаганова сообщало телу Паниковского ускорение, необходимое для изменения направления скорости при повороте за угол.

Надо сказать, что изменение скорости тела зависит не только от силы, но и от самого тела. Без гири слабые ноги Паниковского смогли бы сообщить ему достаточное ускорение и он успешно повернул бы за угол.

Свойство тела, определяющее быстроту изменения его скорости под действием силы, называется в механике массой (или инертной массой). Согласно второму закону Ньютона ускорение (т. е. изменение скорости за единицу времени) тела пропорционально действующей на него силе и обратно пропорционально его массе.

Итак, в классической механике строго определено, что такое сила. Это определение включает

в себя способ измерения сил. Действие сил точным количественным образом связывается с ускорением. Механика — единственная наука, «в которой действительно знают, что означает слово сила» *).

Цена универсальности

Однако и в механике положение с силами вряд ли можно назвать блестящим. Остается не выясненным вопрос о том, почему, вследствие каких физических процессов появляются те или иные силы. Это, по-видимому, чувствовал и сам Ньютон. Ему принадлежат следующие слова: «Я не знаю, чем я кажусь миру; мне же самому кажется, что я был только мальчиком, играющим на берегу моря и развлекающимся тем, что от времени до времени находил более гладкий камешек или более красивую раковину, чем обыкновенно, в то время как великий океан истины лежал предо мною совершенно неразгаданный».

В механике затруднения, касающиеся природы сил, обычно объявляются несущественными просто вследствие отказа говорить о них. Такой подход вполне возможен. Для вычисления траекторий движения тел достаточно знать, чему равна сила количественно. А знать величину сил, определить, когда и как они действуют, можно и не вникая в природу сил, а лишь располагая способами их измерения. Именно поэтому в механике «нет надобности, чтобы определение силы объясняло, что́ есть сила в себе и что́ она — причина или следствие движения» (Анри Пуанкаре).

То обстоятельство, что природа сил не существенна для механики, составляет недостаток механики, но одновременно и является ее преимуществом. Именно поэтому механика успешно описывает движение и молекул, и звезд.

Это прекрасно, но все же «темное пятно» остается. И не удивительно поэтому, что ученые, ощущая отсутствие полной ясности в понимании силы, все время пытались преодолеть подобные трудности. Одни делали это, переходя от несколько формального

*) Ф. Энгельс, Диалектика природы. Госполитиздат, 1950, стр. 56.

введения сил к попыткам более глубокого анализа природы взаимодействий; другие, как, например, знаменитый немецкий физик Г. Герц,— вообще изгоняли понятие силы из механики.

Механика без сил и силы без механики

Герцу удалось построить механику, совершенно не используя понятие силы, но, как оказалось, в известном смысле «игра не стоила свеч». Исключение силы из механики вызвало, с одной стороны, необходимость введения новых гипотез, а с другой стороны, настолько усложнило формулировку основных положений механики, что вся схема Герца в целом не получила признания.

Любопытно отметить, что недостаточная ясность в понимании природы сил, породившая попытки изгнать силу из науки, одновременно привела и к прямо противоположному эффекту. Термин «сила» начал перекочевывать из механики в другие области науки, утрачивая по дороге ту степень строгости, которую он успел приобрести в рамках механики. Ф. Энгельс по этому поводу писал: «... если ту или иную причину движения называют силой, то это нисколько не вредит механике как таковой; но благодаря этому привыкают переносить это обозначение и в область физики, химии и биологии, и тогда неизбежна путаница... Ограничиваясь категорией силы для характеристики процессов, физики тем самым выражали свое незнание сущности этих процессов. Сил было установлено столько, сколько было известно способов взаимодействия тел. Связь их мало кого интересовала» *). С того времени, когда были написаны эти строки, прошло немало лет. Физики уже в основном освободились от подобных тенденций. Но и до сих пор в терминологии сохранились отголоски того периода, о котором говорил Энгельс. Вспомните, например, электродвижущую силу (которая в сущности есть не сила, а работа), живую силу (кинетическую энергию), силу света, силу тока: ни одно из этих понятий никакого отношения к силе в обычном механическом понимании не имеет.

*) Ф. Энгельс, Диалектика природы. Госполитиздат, 1950, стр. 59.

3.

Человеколюбие Роберта Майера

Мы уже говорили о безуспешных попытках изгнать силу из механики. Однако, хотя в классической механике сила была сохранена, тем не менее развитие физики в целом показало, что далеко не всякое взаимодействие можно полностью характеризовать механическими силами.

Поначалу трудно было предполагать, что силе угрожает какая-либо опасность. Созданная Ньютоном механика продолжала развиваться. Наряду с силой был введен ряд других понятий: количество движения, энергия и т. д. Постепенно энергия *) начала приобретать все большее значение. Как и сила, энергия могла количественно характеризовать взаимодействие тел, причем не только взаимодействие, но и состояние их движения.

В механике энергия определяется как скоростями тел, так и характером взаимного действия этих тел друг на друга (последнее для нас особо важно). Более того, оказалось, что все основные положения механики Ньютона могут быть целиком переложены, так сказать, на энергетический язык. Оба описания движения, как силовое, так и энергетическое, являются равноправными **): работа силы равна изменению энергии. Саму же энергию системы тел можно рассматривать как запас той работы, которую может совершить эта система. Количество механической энергии для изолированной системы не остается, вообще говоря, постоянным: при наличии трения оно убывает.

Положение коренным образом изменилось, когда в середине XIX века был точно сформулирован фундаментальный закон современного естествознания — закон сохранения энергии.

*) Надо заметить, что само слово «энергия» первоначально не употреблялось.

**) Если не рассматривать сил, зависящих от скорости, например трения.

Один из творцов этого закона, Роберт Майер, так оценивал его значение: «Теперь, чтобы получить доступ в науку о движении, нам не надо подниматься сперва на высоты математики; наоборот, природа сама предстает в своей простой красоте перед изумленным взором, и даже человек с небольшими способностями может увидеть множество вещей, которые до сих пор оставались скрытыми от величайших ученых».

Закон сохранения утверждает, что энергия, с которой имели дело в механике, ни при каких условиях не исчезает бесследно. Она может только превращаться из одной формы в другую. При исчезновении энергии в механической форме возникает точно такое же количество энергии другого вида. Может, например, происходить нагревание тел.

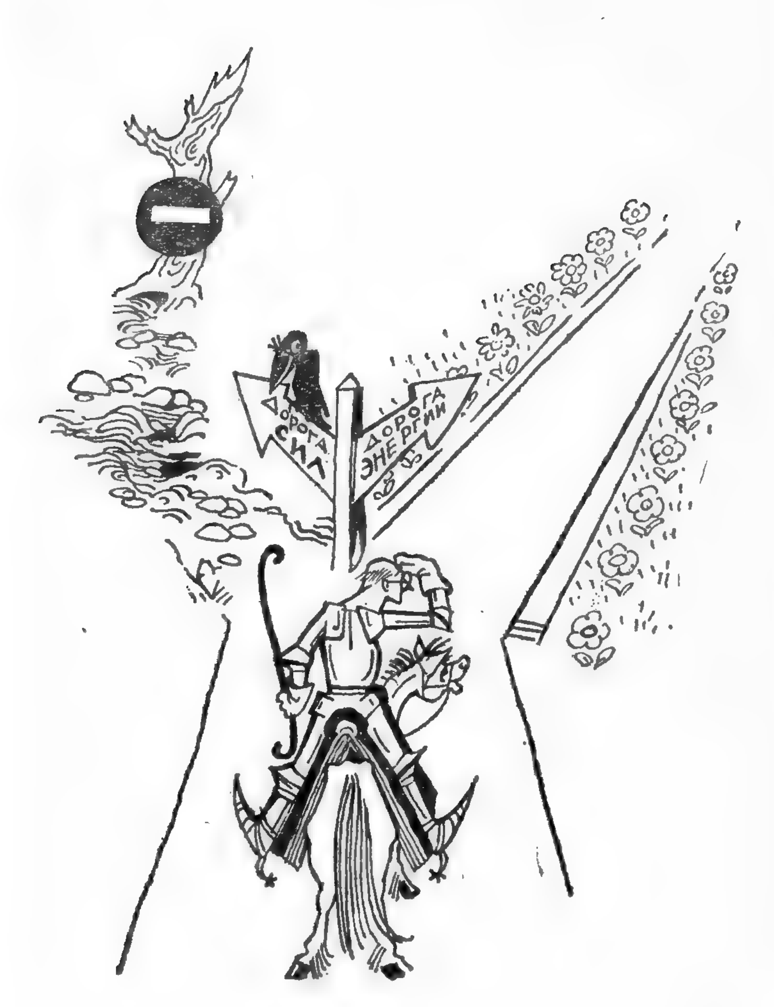
«Яйцо»... «точит лясы»

Энергия оказалась универсальной количественной характеристикой движения и взаимодействия любых тел, от космических объектов до элементарных частиц. Закон сохранения и превращения энергии не ограничивается механическим движением, и поэтому не удивительно, что описание взаимодействий посредством энергии оказалось более общим, чем с помощью сил. Только в рамках механики Ньютона ни одному из них нельзя безоговорочно отдать предпочтения.

Переходы энергии из одной формы в другую можно сравнить с переводами обычных слов на разные языки. Перевод меняет «внешний вид» слова, его начертание и произношение, но при этом само слово, например «яйцо», «das Ei» (нем.), «the egg» (англ.), «l'œuf» (фр.) и т. д., обозначает один и тот же предмет.

Если придерживаться данного сравнения, то силы походят скорее на идиоматические выражения (например, «точить лясы», «у черта на куличках» и т. д.), полные смысла и глубины только в породившем их языке (здесь это язык механики), но становящиеся бессмысленными при буквальном переводе.

Сейчас может показаться курьезом тот факт, что первоначально, пока еще не утвердился термин «энергия», для обозначения новой физической вели-



чины пользовались опять-таки словом сила. Работа Гельмгольца, с именем которого (наряду с Майером и Джоулем) связано открытие закона сохранения энергии, называлась «О сохранении силы». «Если раз допустить слово сила в двояком его значении, то потом будет сизифовой работой пытаться провести различие во всех частных случаях»,— писал Майер. Майер почти всю жизнь настаивал на том, чтобы слово сила сохранилось только для обозначения того, что

мы сейчас называем энергией. Легко себе представить, какое «вавилонское смешение языков» можно при этом получить.

Вследствие большей универсальности понятия энергии не могло со временем не произойти постепенного вытесенения силового описания энергетическим.

Когда законы Ньютона объявляют забастовку

Ведь понятие силы имеет точный количественный смысл только в механике, понятие же энергии охватывает процессы любой природы: существует тепловая энергия, электромагнитная энергия, ядерная энергия и т. д. Ньютоновское описание движения приспособлено для случаев, когда сравнительно простые силы приводят к движениям, которые могут оказаться достаточно сложными. Так, например, выражаемые весьма просто силы всемирного тяготения приводят к очень сложным траекториям планет, если учитывать не только притяжение планет к Солнцу, но и их взаимные влияния друг на друга. Представьте теперь, что вы переходите от описания движения небольшого числа тел к изучению сотен, тысяч, миллионов и т. д. частиц. Можно, конечно, тешить себя иллюзией, что «в принципе» ньютоновская механика могла бы совершенно точно описать и такие системы, т. е. определить в любой момент времени положение и скорость любой частицы. Однако на самом деле механический подход вообще теряет здесь смысл. Сама точная постановка задачи (определение начальных положений и скоростей частиц, а также задание сил взаимодействия между ними) не проще ее решения. И действительно, поведение совокупности большого числа частиц обнаруживает новые типы законов, не сводимые к механике,— законы статистической физики.

Сумма сил в стакане воды

В статистической физике с самого начала отказываются от попыток проследить за движением отдельных частиц и рассматривают сразу среднее поведение большой их совокупности. Так вот: поскольку энергия сохраняется, мы с полным правом можем говорить о средней энергии, которой обладают частицы системы. Но средняя сила взаимо

действия частиц друг с другом не сохраняется, и для большой совокупности частиц такое понятие теряет смысл.

Силы взаимодействия между отдельными парами частиц системы равны по величине и направлены навстречу друг другу. Поэтому *полная сумма сил, действующих внутри системы*, вообще равна нулю. Можно только говорить о той средней силе, с которой *система* (например, газ в цилиндре) *действует на какое-нибудь постороннее тело* (например, на поршень, запирающий газ).

Отметим еще одно обстоятельство. Изменение состояния вещества под влиянием внешних воздействий всегда связано с изменением его энергии. Но это изменение не равно работе сил, как в механике. Чайник на плите преспокойно выкипает, хотя не видно сил и механическая работа не совершается.

Об одном великом споре

Задолго до того, как в науке появились представления о молекулярном движении и его статистическом описании, в недрах самой механики возник такой, на первый взгляд, не очень уж важный вопрос: мгновенно ли осуществляется взаимодействие между телами, или для этого требуется определенное время?

В главах о гравитационных и электромагнитных силах мы подробно расскажем о споре сторонников «дальнодействия», т. е. мгновенного взаимодействия прямо через пустое пространство без каких бы то ни было посредников, и тех, кто отстаивал идею близкодействия, прямо противоположную первой. Аргументы, наметившие перелом в этом споре, появились одновременно с созданием теории электромагнитных явлений. И эти аргументы были в пользу близкодействия. Здесь впервые со всей очевидностью выяснилось, что весточка о каждом заряде, или токе, не мгновенно разносится на любые расстояния, что передача взаимодействия происходит лишь за определенное время. Иными словами, любой «сигнал» распространяется хотя и с очень большой, но все же не бесконечной скоростью. И как только это было доказано, сразу же встал вопрос: а как же ньютоновская механика? Ведь в механике действия тел

друг на друга всегда являются взаимными. Сила, с которой, к примеру, книга давит на стол, равна по величине и противоположна по направлению силе, действующей со стороны стола на книгу. Действие всегда равно противодействию согласно третьему закону Ньютона.

Если же быстро передвинуть один из двух взаимодействующих зарядов, то другой некоторое время этого не почувствует. На него будет действовать прежняя сила, в то время как первый, едва переместившись, сразу же окажется под действием изменившихся сил. Действие оказывается не равным противодействию.

Это не мелочь и, как мы увидим в дальнейшем, не случайная деталь. Все дело в том, что *посредник, выступающий при взаимодействии зарядов — электромагнитное поле,— не является механической системой*, т. е. не может быть описано механикой Ньютона. Об электромагнитном поле нельзя говорить как о системе материальных точек, движущихся по законам ньютоновской механики. Самый язык механики, весь арсенал ее образов не годится здесь для описания объекта.

Если и можно говорить о действии сил на частицу со стороны поля, то говорить о силе, действующей на поле со стороны частицы, уже нельзя. Это очень важно! Если теряет смысл механическое описание, то нужно вводить какие-то другие мерила взаимодействия. Искать их долго не приходится. Энергия и здесь превосходно справляется с этой ролью.

Положение вещей в теории электромагнитных явлений отнюдь не исключительное. *Завоевавшая теперь безусловное господство точка зрения близкодействия, т. е. взаимодействия посредством тех или иных полей, накладывает ограничения на использование сил как инструмента для описания взаимодействий.*

В атом не поместишь пружинку

Несмотря на все осложнения, связанные с введением полей, механика Ньютона все же вполне успешно работает, например, при описании движения заряженных тел в заданных электромагнитных полях. (Электромагнитные поля, разумеется, не подчиняются зако-

нам механики, распространяющим свою власть только на движение самих тел.). Но даже такая половинчатая годность механики имеет место далеко не всегда.

В мире элементарных частиц с помощью сил нельзя описывать взаимодействие не только больших коллективов частиц, но и отдельных индивидуумов, населяющих этот мир.

В механике принимается, что тело движется по определенной траектории и в каждой точке траектории имеет определенную скорость. Под действием силы эта скорость меняется от точки к точке. В случае же движения элементарных частиц скорость в точке не имеет никакого определенного значения. Элементарную частицу, например электрон, нельзя рассматривать просто как шарик очень малых размеров. Электрон несомненно движется в пространстве с течением времени, но это движение нельзя представить себе наглядно как перемещение вдоль некоторой линии — траектории. А измерить силу непосредственно с помощью пружинных весов в микромире невозможно. В атом нельзя поместить пружинку для измерения силы взаимодействия электрона с ядром.

Вся классическая механика, а вместе с ней и понятие силы, не применимы, вообще говоря, к элементарным частицам. Характеризовать точным образом взаимодействие элементарных частиц в атомах и атомных ядрах с помощью сил нельзя. Энергетическое описание здесь становится единственно возможным. Энергия настолько универсальна, что закон сохранения энергии распространяется и на элементарные частицы, приобретая, правда, при этом более сложную форму.

Сила — взаимодействие

Тем не менее и в атомной физике часто говорят о силах. Все, наверное, слышали о ядерных силах, действующих в атомном ядре, об электромагнитных силах взаимодействия электронов и т. д. В этих случаях мы встречаемся с новым и, надо надеяться, последним значением этого удивительного слова. Это уже не те силы, с которыми имеет дело механика. *Термин «сила» стано-*

вится здесь синонимом слова «взаимодействие». Это уже не точно определенная количественная величина, которую можно измерить, можно поставить в уравнение, описывающее реальные процессы. Это просто качественное определение типа взаимодействия, указание на его природу.

Таким образом, в современной науке слово «сила» употребляют в двух смыслах: во-первых, в смысле механической силы, и здесь она является точной количественной мерой взаимодействия, и, во-вторых,— гораздо чаще — обозначает просто наличие взаимодействия определенного сорта, точной количественной мерой которого может быть только энергия. Говоря, например, о ядерных силах, мы имеем в виду именно второе значение этого слова. Включить ядерные силы в рамки механики Ньютона принципиально невозможно.

Конечно, можно было бы обойтись и без употребления силы в этом новом значении. В некотором смысле это ведь шаг назад. Но, по-видимому, привычка к этому слову столь велика, оно столь прочно вошло в наш язык, что будет сохранено и в дальнейшем.

Слова не только в общеупотребительном языке, но и в научном живут своей особой жизнью и выкинуть их нельзя ни с помощью «разумных» доводов против них, ни в законодательном порядке.

4.

Сколько сил в природе!

Мы решили назвать эту книгу «Силы в природе», имея в виду главным образом второе значение этого слова в современной науке. Но в большом числе случаев силы, о которых пойдет речь в дальнейшем можно понимать и в более узком «механическом смысле».

Наш рассказ в первую очередь будет посвящен природе сил, т. е. вопросу, от рассмотрения которого

механика отказывается. Здесь сразу же возникает проблема первостепенной важности: сколько различных типов сил, т. е. типов взаимодействий, существует в мире?

В настоящее время, когда говорят о единстве природы, обычно имеют в виду единство в строении вещества: все тела построены всего лишь из нескольких сортов элементарных частиц. Однако в этом проявляется только одна сторона единства природы. Не менее существенно и другое.

Несмотря на удивительное разнообразие взаимодействий тел друг с другом, взаимодействий, сводящихся в конце концов к взаимодействию элементарных частиц, в природе по современным данным имеется четыре типа взаимодействий: всемирное тяготение, электромагнитные, ядерные и слабые взаимодействия*). Из них только два первых типа можно рассматривать в смысле ньютоновой механики. С проявлениями всех четырех типов сил мы встречаемся, изучая то, что происходит в безграничных просторах Вселенной, на нашей планете, исследуя любой кусок вещества, живые организмы, атомы, атомные ядра, взаимные превращения элементарных частиц.

О гравитационных, электромагнитных, ядерных и слабых взаимодействиях мы знаем многое.

Что же подразумевается под силами данных четырех типов? Почему и как мы можем, опираясь на них, объяснить огромное число явлений?

Ответ на эти вопросы и составляет содержание книги.

Единство сил природы неразрывно связано с единством в строении вещества. Одно не только не мыслимо без другого, но скорее можно сказать, что то и другое выражает разные стороны глубоко заложенного в природе вещей единства мира. Сравнительно малому числу сортов элементарных частиц соответствует еще меньшее число типов взаимодействий между ними. И это число, к тому же, по мнению теоретиков может еще уменьшиться.

*) Мы не касаемся так называемых несиловых взаимодействий, выражаемых в квантовой механике принципом Паули.

Что будет в книге?

Теперь наш рассказ пойдет о самом главном. Что представляют собой перечисленные типы взаимодействий и как они были открыты? Каким образом бесчисленное многообразие проявлений взаимных действий тел друг на друга можно объяснить немногими общими законами? Какова сфера действия различных сил в природе, какова их роль в различных процессах? Наконец, нужно рассказать о взаимоотношении сил; о той гармонии сил природы, которая обеспечивает относительную устойчивость, а также непрерывное развитие, обновление Вселенной, где все силы в равной степени необходимы.

Мы начнем с того, с чего в физике начался процесс изучения природы сил. Начнем с рассказа о силах всемирного тяготения, или гравитационных силах. Гравитационные силы стоят в начале той поразительной цепи открытий, которая привела к установлению единства сил природы.

Глава вторая

ГРАВИТАЦИОННЫЕ СИЛЫ

Текли дугою звезды —
и до нас!
Сияли людям зори —
и до нас!

Омар Хайям, «Рубайи»



1. *От Анаксагора до Ньютона.*

2. *Закон всемирного тяготения.*

3. *Гравитация в действии.*

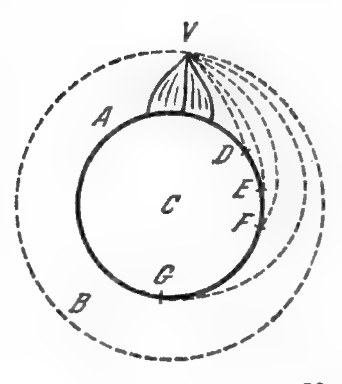
4. *Геометрия и тяготение.*

1.

Бесконечное падение

В «Математических началах натуральной философии» великого Ньютона есть рисунок под номером 213, замечательный тем, что при всей своей простоте он позволяет понять глубокую связь между «земной» и «небесной» механикой. В подписи к этому рисунку говорится: «Брошенный камень отклонится под действием тяжести от прямолинейного пути и, описав кривую траекторию, упадет наконец на Землю. Если его бросить с большой скоростью, то он упадет дальше». Продолжая эти рассуждения, Ньютон приходит к выводу, что если бы не сопротивление воздуха, то по достижении достаточной скорости траектория сделается такой, что камень может вообще никогда не достигнуть поверхности Земли, а станет двигаться вокруг нее, «подобно тому, как планеты описывают в небесном пространстве свои орбиты». Нельзя не вспомнить этой цитаты особенно сейчас, после многочисленных запусков искусственных спутников и космических кораблей.

Итак, движение планет, например Луны вокруг Земли или Земли вокруг Солнца,— это то же падение, но только падение, которое длится бесконечно долго *). Причиной такого «падения», идет ли речь действительно о падении обычного камня на Землю или о движении планет по их орбитам, является сила тяготения.



Догадка о единстве причин, управляющих движением планет и падением земных тел, высказывалась учеными еще задолго до Ньютона. По-видимому, первым ясно высказал эту мысль гречес-

*) Во всяком случае, если отвлечься от перехода энергии в «немеханические» формы.

кий философ Анаксагор, выходец из Малой Азии, живший в Афинах почти две тысячи лет назад. Он говорил, что Луна, если бы не двигалась, упала бы на Землю, как падает камень из пращи. Не правда ли, сказано неплохо, особенно если учесть, что такое высказывание появилось более чем за двадцать веков до Ньютона.

Однако никакого практического влияния на развитие науки гениальная догадка Анаксагора, по-видимому, не имела. Ей суждено было оказаться не понятой современниками и забытой потомками. Античные и средневековые мыслители, чье внимание привлекало движение планет, были очень далеки от правильного (а чаще вообще от какого бы то ни было) истолкования причин этого движения. Ведь даже великий Кеплер, сумевший ценой гигантского труда сформулировать точные математические законы движения планет, считал, что причиной этого движения является вращение Солнца.

Согласно представлениям Кеплера, Солнце, вращаясь, постоянными толчками увлекает планеты во вращение. Правда, оставалось непонятным, почему время обращения планет вокруг Солнца отличается от периода обращения Солнца вокруг своей оси. Кеплер писал об этом: «... если бы планеты не обладали природным сопротивлением, то нельзя было бы указать причины, почему бы им не следовать в точности вращению Солнца. Но хотя в действительности все планеты движутся в том же самом направлении, в котором совершается и вращение Солнца, скорость их движения не одинакова. Дело в том, что они смешивают в известных пропорциях косность своей собственной массы со скоростью своего движения».

Кеплер не смог понять, что совпадение направлений движения планет вокруг Солнца с направлением вращения Солнца вокруг своей оси связано не с *законами движения планет*, а с *происхождением* нашей солнечной системы. Искусственная планета может быть запущена как в направлении вращения Солнца, так и против этого вращения.

Гораздо ближе, чем Кеплер, подошел к открытию закона притяжения тел Роберт Гук. Вот его подлинные слова из работы под названием «Попытка изу-

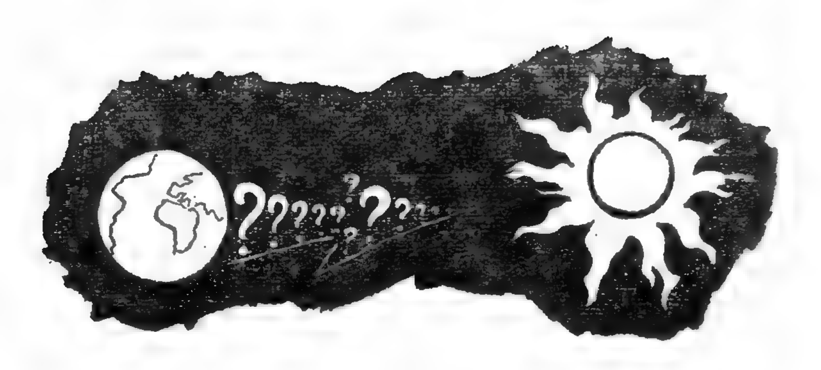
чения движения Земли», вышедшей в свет в 1674 году: «Я разовью теорию, которая во всех отношениях согласуется с общепризнанными правилами механики. Теория эта основывается на трех допущениях: во-первых, что все без исключения небесные тела обладают направленным к их центру притяжением или тяжестью, благодаря которой они притягивают не только свои собственные части, но также и все находящиеся в сфере их действия небесные тела. Согласно второму допущению все тела, движущиеся прямолинейно и равномерным образом, будут двигаться по прямой линии до тех пор, пока они не будут отклонены какой-нибудь силой и не станут описывать траектории по кругу, эллипсу или какой-нибудь другой менее простой кривой. Согласно третьему допущению силы притяжения действуют тем больше, чем ближе к ним находятся тела, на которые они действуют. Я не мог еще установить при помощи опыта, каковы различные степени притяжения. Но если развивать дальше эту идею, то астрономы сумеют определить закон, согласно которому движутся все небесные тела».

Воистину можно лишь изумляться, что сам Гук не захотел заняться развитием этих идей, ссылаясь на занятость другими работами.

Механика Ньютона и тяготение

История открытия Ньютоном закона всемирного тяготения достаточно известна. Поэтому вряд ли стоит подробно рассказывать, что впервые мысль о том, что природа сил, заставляющих падать камень и определяющих движение небесных тел,— одна и та же, возникла еще у Ньютона-студента, что первые вычисления не дали правильных результатов, так как имевшиеся в то время данные о расстоянии от Земли до Луны были неточными, что 16 лет спустя появились новые, исправленные сведения об этом расстоянии. После того как были проведены новые расчеты, охватившие движения Луны, всех открытых к тому времени планет солнечной системы, комет, приливы и отливы, теория была опубликована.

Открытие закона всемирного тяготения по праву считается одним из величайших триумфов науки.



И, связывая этот триумф с именем Ньютона, невольно хочется спросить, почему именно этому гениальному естествоиспытателю, а не Галилею, например, открывшему законы свободного падения тел (и, кстати сказать, уделявшему астрономии гораздо больше внимания, чем Ньютон), не Роберту Гуку или кому-либо из других замечательных предшественников или современников Ньютона удалось сделать это открытие?

Дело здесь не в простой случайности, не в падающих яблоках и даже не в степени гениальности, хотя это обстоятельство, конечно, весьма существенно. Главным, определяющим явилось то, что в руках Ньютона были открытые им законы, применимые к описанию любых движений. Именно эти законы, то, что мы сейчас называем механикой Ньютона, позволили с полной очевидностью понять, что корнем всех явлений, основой, определяющей особенности движения, являются силы. Ньютон был первым, кто абсолютно ясно понимал, *что́ именно* нужно искать для объяснения движения планет,— *искать нужно было силы и только силы.*

Кеплером были точно установлены траектории планет солнечной системы, было найдено, как положения планет в пространстве меняются с течением времени. При заданной траектории уравнение движения позволяет немедленно определить силу, вызывающую рассматриваемое движение. Эта задача и была решена Ньютоном.

Что же представляют собой эти силы? Какова их роль, их место в природе? И, наконец, каково их физическое происхождение?

Вопросов, как видите, немало, и полного их решения сегодня мы еще не имеем. На них должна ответить физика завтрашнего дня. Но многое, и в первую очередь самый закон всемирного тяготения, четко сформулированный Ньютоном, уже давно стало достоянием науки.

2.

Действуют на все и не знают преград

Одно из самых замечательных свойств сил всемирного тяготения, или, как их часто называют, гравитационных сил, отражено уже в самом названии, данном Ньютоном: *всемирные*. Эти силы, если так можно выразиться, «самые универсальные» среди всех сил природы. Все, что имеет массу — а масса присуща любой форме, любому виду материи,— должно испытывать гравитационные воздействия. Исключения не составляет даже свет. Если представлять себе наглядно гравитационные силы с помощью ниточек, которые тянутся от одних тел к другим, то бесчисленное множество таких ниточек должно было бы пронизывать пространство в любом месте. При этом нелишне заметить, что порвать такую ниточку, загородиться от гравитационных сил невозможно. Для всемирного тяготения нет преград. Мы можем всегда поставить непреодолимый барьер для электрического поля (таким барьером может служить экран из любого достаточно хорошо проводящего материала); внутрь сверхпроводника, как известно, не проникнет магнитное поле. Но гравитационное взаимодействие свободно передается через любые тела. Экраны из особых веществ, непроницаемых для гравитации (вроде кеворита из романа Г. Уэллса «Первые люди на Луне»), могут существовать только в воображении авторов научно-фантастических книг.

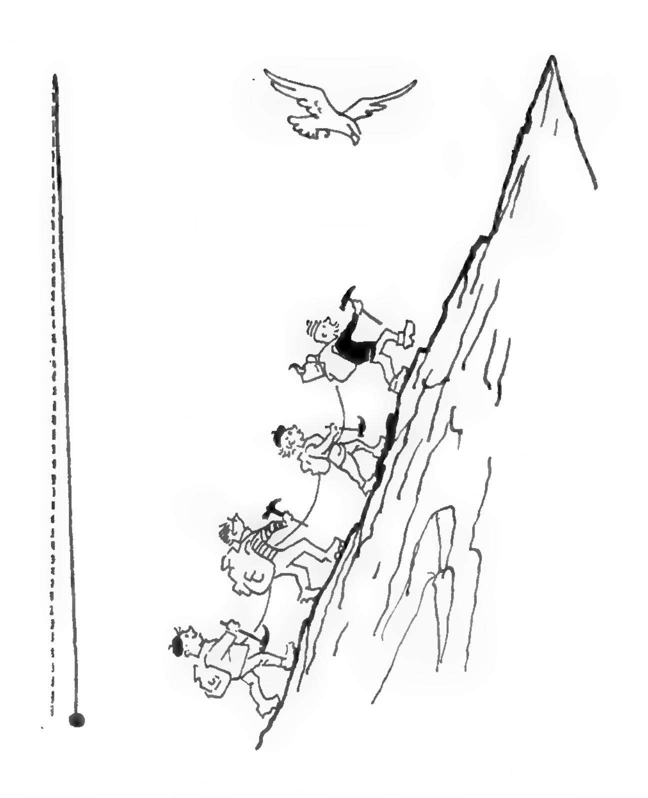
Сравнительно недавно появилось сообщение об измерениях французского астронома Аллена, произ-

веденных во время солнечного затмения. Из анализа этих изменений как будто вытекало, что существует гравитационная тень, что сила притяжения Земли Солнцем уменьшается, когда между ними находится Луна. Что же оказалось в действительности? Просто не было учтено то изменение температуры приборов, которое неизбежно во время затмения. Именно этот, на первый взгляд незначительный эффект и ввел Аллена в заблуждение. Недавно советскому физику В. Б. Брагинскому с рекордной точностью — 10^{-12} от веса тела — удалось экспериментально доказать отсутствие гравитационной тени.

Велики ли гравитационные силы!

Итак, гравитационные силы вездесущи и всепроникающи. Почему же мы не ощущаем притяжения большинства тел? Почему, например, притяжение Земли чувствуется на каждом шагу, а даже самые высокие горы, эти громады камня, если и притягивают к себе, то разве что только орлов и альпинистов? Если подсчитать, какую долю от притяжения Земли составляет, например, притяжение Эвереста (в самых благоприятных в смысле расположения условиях), то окажется, что лишь тысячные доли процента. Сила же взаимного притяжения двух людей среднего веса при расстоянии между ними в один метр не превышает трех сотых миллиграмма. Так слабы гравитационные силы. Здесь некоторые из читателей, возможно, остановятся в удивлении. Слабы?! Как можно назвать слабым такой «канат», на котором можно подвесить Землю к Солнцу или Луну к Земле, особенно принимая во внимание огромные расстояния между ними? Подобного рода недоумения возникали не раз. Известный популяризатор науки Я. И. Перельман сообщает, например, о появлении в конце XIX века (сравнительно недавно, стало быть) книги Карпентера «Современная наука», автор которой говорил о том, что чрезвычайная слабость гравитационных сил, утверждаемая в физике, вообще подрывает доверие к этой науке. Любопытно отметить, что книга вышла с сочувственным предисловием Л. Н. Толстого.

Тот факт, что гравитационные силы, вообще говоря, гораздо слабее электрических, вызывает своеоб-

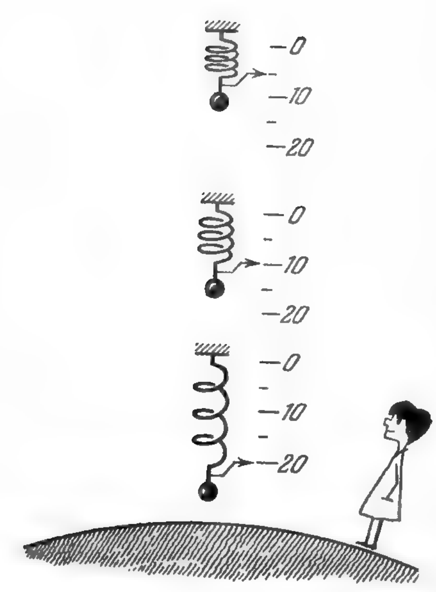


разное разделение сфер влияния этих сил. Например, подсчитав, что в атомах гравитационное притяжение электронов к ядру слабее, чем электрическое, в 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 раз, легко понять, что процессы внутри атома определяются практически одними лишь электрическими силами (если не касаться пока внутриядерных процессов). Гравитационные силы становятся ощутимыми, а порой и грандиозными, когда на сцену выступают такие огромные массы, как массы космических тел: планет, звезд и т. д.

Так, Земля и Луна притягиваются с силой примерно в 20 000 000 000 000 000 тонн. Даже такие далекие от нас звезды, свет которых годы идет до Земли, шлют нам свой гравитационный привет, выражающийся внушительной цифрой,— это сотни миллионов тонн.

Радиус их действия равен бесконечности

Мы уже фактически молчаливо приняли, что взаимное притяжение двух тел убывает по мере их удаления друг от друга. Это так наглядно и кажется таким очевидным, что редко у кого возникают сомнения на этот счет. Но давайте попробуем мысленно проделать такой опыт: будем измерять силу, с которой Земля притягивает какое-либо тело, например двадцатикилограммовую гирю. Первый опыт пусть соответствует таким условиям, когда гиря помещена на очень большом расстоянии от Земли. В этих условиях сила притяжения (которую, кстати, можно измерять с помощью самых обыкновенных пружинных весов) практически будет равна нулю. По мере приближения гири к Земле появится и будет постепенно возрастать взаимное притяжение, и, наконец, когда гиря окажется на поверхности Земли, стрелка пружинных весов остановится на делении «20 килограммов», поскольку то, что мы называем весом, отвлекаясь от вращения Земли, есть не что иное, как сила, с которой Земля притягивает тела, расположенные на ее поверхности. Ну, а если продолжить наш опыт и опустить гирю в глубокую шахту? Легко сообразить, что это уменьшит действующую на гирю силу. Это видно хотя бы из того, что если бы мы, продолжая наш воображаемый опыт, поместили гирю в центр Земли, то притяжение со всех сторон взаимно уравновесилось бы и стрелка пружинных весов стояла бы точно на нуле. Итак, нельзя, оказывается, просто



сказать, что гравитационные силы убывают с увеличением расстояния — нужно всегда оговариваться, что сами эти расстояния при такой формулировке принимаются много большими, чем размеры тел. Именно в этом случае справедлив сформулированный Ньютоном закон: *силы всемирного тяготения убывают обратно пропорционально квадрату расстояния между притягивающимися телами*. Попробуем пояснее представить себе, что это значит. Арифметически это означает, что если, например, расстояние увеличивается в три раза, то сила уменьшается в 3^2, т. е. в девять раз, и т. д. Однако из этого подсчета еще не ясно, что это — быстрое или не очень быстрое изменение с расстоянием? Означает ли такой закон, что взаимодействие практически ощущается лишь между ближайшими соседями, или же оно заметно и на достаточно больших расстояниях?

Ответ на этот вопрос, пожалуй, удобнее всего дать, сравнивая закон убывания с расстоянием гравитационных сил с законом, по которому уменьшается освещенность по мере удаления от источника. Как в одном, так и в другом случае действует, оказывается, один и тот же закон — обратная пропорциональность квадрату расстояния. Но ведь мы видим звезды, находящиеся от нас на таких огромных расстояниях, пройти которые даже световой луч, не имеющий соперников по скорости, может лишь за миллиарды лет! А ведь если до нас доходит свет от этих звезд, значит (закон-то убывания одинаковый) должно, хотя бы и очень слабо, чувствоваться их притяжение. Следовательно, действие сил всемирного тяготения простирается, непрерывно убывая, практически на неограниченные расстояния. Как говорят физики, радиус их действия равен бесконечности. *Гравитационные силы — это дальнодействующие силы*. Таково «официальное название» этих сил в физике. Далеко не все силы, как мы увидим в дальнейшем, имеют такой характер. Вследствие дальнодействия гравитация связывает все тела Вселенной.

Относительная медленность убывания сил с расстоянием на каждом шагу проявляется в наших земных условиях: ведь все тела не изменяют своего веса, будучи перенесенными с одной высоты на

другую (или, если быть более точными, меняют, но крайне незначительно), именно потому, что при относительно малом изменении расстояния — в данном случае до центра Земли — гравитационные силы практически не изменяются.

Кстати, отметим, что именно по этой причине закон изменения гравитационных сил с расстоянием был открыт «на небе». Все необходимые данные черпались здесь из астрономии. Не следует, однако, думать, что уменьшение силы тяжести с высотой нельзя обнаружить в земных условиях. Так, например, маятниковые часы с периодом колебания в одну секунду отстанут в сутки почти на три секунды, если их поднять из подвала на верхний этаж Московского университета (200 метров) — и это только за счет уменьшения силы тяжести.

Высоты, на которых движутся искусственные спутники, уже сравнимы с радиусом Земли, так что для расчета их траектории учет изменения силы земного притяжения с расстоянием совершенно необходим.

Необыкновенное свойство гравитационных сил

В течение многих веков средневековая наука принимала как незыблемую догму утверждение Аристотеля о том, что тело падает тем быстрее, чем больше его вес. Даже повседневный опыт подтверждает это: ведь известно, что пушинка падает медленнее, чем камень. Однако, как впервые сумел показать Галилей, все дело здесь в том, что сопротивление воздуха, вступая в игру, радикально искажает ту картину, которая была бы, если бы на все тела действовало одно только земное притяжение. Существует замечательный по своей наглядности опыт с так называемой трубкой Ньютона, позволяющий очень просто оценить роль сопротивления воздуха. Вот краткое описание этого опыта. Представьте себе обыкновенную стеклянную (чтобы было видно, что делается внутри) трубку, в которую помещены различные предметы: дробинки, кусочки пробки, перышки или пушинки и т. д. Если перевернуть трубку так, чтобы все это могло падать, то быстрее всего промелькнет дробинка, за ней — кусочки пробки и, наконец, плавно опустится пух. Но попробуем проследить за падением тех же пред-

метов, когда из трубки выкачан воздух. Пушинка, потеряв былую медлительность, несется, не отставая от дробинки и пробки. Значит, ее движение раньше задерживалось сопротивлением воздуха, которое в меньшей степени сказывалось на движении пробки и еще меньше на движении дробинки. Следовательно, если бы не сопротивление воздуха, если бы на тела действовали только силы всемирного тяготения — в частном случае земное притяжение,— то все тела падали бы совершенно одинаково, ускоряясь в одном и том же темпе.

Но «ничего не ново под луной». Две тысячи лет тому назад Лукреций Кар в своей знаменитой поэме «О природе вещей» писал:

...все то, что падает в воздухе редком,
Падать быстрее должно в соответствии с собственным весом
Лишь потому, что воды или воздуха тонкая сущность
Не в состояньи вещам одинаковых ставить препятствий,
Но уступает скорее имеющим большую тяжесть.
Наоборот, никогда никакую нигде не способна
Вещь задержать пустота и явиться какой-то опорой,
В силу природы своей постоянно всему уступая.
Должно поэтому все, проносясь в пустоте без препятствий,
Равную скорость иметь, несмотря на различие в весе.

Конечно, эти замечательные слова были только прекрасной догадкой. Чтобы превратить эту догадку в надежно установленный закон, потребовалось множество опытов, начиная с знаменитых экспериментов Галилея, изучавшего падение с известной наклонной Пизанской башни шаров одинаковых размеров, но сделанных из различных материалов (мрамора, дерева, свинца и т. д.), и кончая сложнейшими современными измерениями влияния гравитации на свет. И все это многообразие экспериментальных данных настойчиво укрепляет нас в убеждении, что гравитационные силы сообщают всем телам одинаковое уско-



рение; в частности, ускорение свободного падения, вызванное земным притяжением, одинаково для всех тел и не зависит ни от состава, ни от строения, ни от массы самих тел.



Этот, повторяем, простой, как будто бы, закон и выражает собой, пожалуй, самую замечательную особенность гравитационных сил. Нет буквально никаких других сил, которые бы одинаково ускоряли все тела независимо от их массы. Вот, например, футболист ударил по мячу. Чем легче мяч, тем бóльшую скорость он получит (при одинаковой силе и длительности удара). Ну, а что бы вы сказали о футболисте, удар которого одинаково ускорял бы как обыкновенный кожаный мяч, так, скажем, и двухпудовую гирю или даже слона? Каждый скажет, что это совершенно невероятно. Но ведь именно так обстоят дела при гравитационных воздействиях, с той только разницей, что, если так можно выразиться, гравитационный «удар» длится непрерывно, никогда не прекращаясь.

О том, какой глубокий физический смысл скрывается за указанной замечательной особенностью гравитационных сил, мы еще будем много говорить при обсуждении вопроса о природе всемирного тяготения, о том, что носит название общей теории относительности. Сейчас нам нужно будет вспомнить,





что лежит в основе описания движения в механике. В свое время, говоря об определении силы в механике, мы вынуждены были опереться на ньютоновские законы механики, согласно которым сообщаемое телу ускорение прямо пропорционально действующей на него силе и обратно пропорционально массе тела. Это приводит к простому и замечательному выводу: чтобы ускорение не зависело от массы, необходимо, чтобы сила была пропорциональна массе. Вот, например, два тела: мячик для пинг-понга и такой же по размеру свинцовый шарик. Масса первого примерно в 300 раз меньше массы второго. Значит, чтобы сообщить свинцовому шарику такое же ускорение, как и мячику, на него нужно подействовать в триста раз большей силой. Но под влиянием земного притяжения и мячик и свинцовый шарик падают как раз с одинаковым ускорением. Стало быть, это притяжение отрегулировано в соответствии с массами тел: во сколько раз масса свинцового шарика

больше массы мячика, во столько больше и его притяжение к Земле.

Итак, замечательное свойство сил всемирного тяготения можно спрессовать в одно короткое утверждение: *гравитационная сила пропорциональна массе тел*. Подчеркнем, что здесь речь идет о той самой массе, которая в законах Ньютона выступает как мера инерции. Ее даже называют инертной массой.

В четырех словах «гравитационная сила пропорциональна массе» заключен удивительно глубокий смысл. Большие и малые тела, горячие и холодные, самого различного химического состава, любого строения — все они испытывают одинаковое гравитационное взаимодействие, если массы их равны.

А может быть, этот закон и действительно прост? Ведь Галилей, например, считал его чуть ли не самоочевидным. Вот его рассуждения. Пусть падают два тела разного веса. По Аристотелю тяжелое тело должно падать быстрее даже в пустоте. Теперь соединим тела. Тогда, с одной стороны, тела должны падать быстрее, так как общий вес увеличился. Но, с другой стороны, добавление к тяжелому телу части, падающей медленнее, должно тормозить это тело. Налицо противоречие, которое можно устранить, только если допустить, что все тела под действием одного только земного притяжения падают с одинаковым ускорением.

Как будто все последовательно! Однако вдумаемся еще раз в приведенное рассуждение. Оно строится на распространенном методе доказательства «от противного»: предположив, что более тяжелое тело падает быстрее легкого, мы пришли к противоречию. Заметьте: с самого начала появилось предположение, что ускорение свободного падения определяется *весом* и только *весом*. (Строго говоря, не весом, а массой.)

Но ведь это заранее (т. е. до эксперимента) вовсе не очевидно. А что, если бы это ускорение определялось объемом тел? Или температурой? Или, наконец (дадим волю фантазии), цветом или запахом? Короче говоря, представим себе, что существует гравитационный заряд, аналогичный электрическому и, как этот последний, совершенно не связанный непосред-

ственно с массой. Сравнение с электрическим зарядом очень полезно. Вот две пылинки между заряженными пластинами конденсатора. Пусть у этих пылинок равные заряды, а массы относятся как 1 к 2. Тогда ускорения должны отличаться в два раза: силы, определяемые зарядами, равны, а при равных силах тело вдвое большей массы ускоряется вдвое меньше. Если же соединить пылинки, то, очевидно, ускорение будет иметь новое, промежуточное значение. Никакой умозрительный подход без экспериментального исследования электрических сил ничего здесь не может дать. Точно такой же была бы картина, если бы гравитационный заряд не был связан с массой. А ответить на вопрос о том, есть ли такая связь, может лишь опыт. И нам теперь понятно, что именно эксперименты, доказавшие одинаковость обусловленного гравитацией ускорения для всех тел, показали, по существу, что гравитационный заряд (гравитационная или тяжелая масса) равен инертной массе.

Опыт и только опыт может служить как основой для физических законов, так и критерием их справедливости. Вспомним хотя бы о рекордных по точности экспериментах, проведенных под руководством В. Б. Брагинского в МГУ. Эти опыты, в которых была получена точность порядка 10^{-12}, еще раз подтвердили равенство тяжелой и инертной массы.

Именно на опыте, на широком испытании природы — от скромных масштабов небольшой лаборарии ученого до грандиозных космических масштабов — основан закон всемирного тяготения, который (если подытожить все сказанное выше) гласит:

Сила взаимного притяжения любых двух тел, размеры которых гораздо меньше расстояния между ними, пропорциональна произведению масс этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между этими телами.

Коэффициент пропорциональности называется гравитационной постоянной. Если измерять длину в сантиметрах, время в секундах, а массу в граммах, гравитационная постоянная будет округленно равна $6{,}68 \cdot 10^{-8}$, причем ее размерность будет соответственно *см*^{3}/*г*$\cdot$*сек*^{2}.

3.

Солнечная система

Слова «небесная механика», звучащие сейчас чуть старомодно, пришли в науку не случайно. На небесных объектах впервые испытывался закон всемирного тяготения. Именно чарующая стройность единого математического закона, управляющего движением планет в их извечном кружении вокруг Солнца, впервые с покоряющей силой привлекла к ньютоновской теории физиков, астрономов, да и вообще всех естествоиспытателей.

С исследованием движения планет связан один из величайших триумфов естествознания: предсказание французским ученым Леверрье и англичанином Адамсом новой планеты — Нептуна. Небольшие отклонения в движении Урана по орбите от значений, рассчитанных по теории Ньютона, были объяснены возмущением со стороны новой, неизвестной планеты. Ее орбита была вычислена, и, как только астрономы направили свои телескопы в указанный участок неба, новая планета была сразу же обнаружена.

До сегодняшнего дня всемирное тяготение остается в нашем представлении основной пружиной движения космических тел.

Может показаться странным, почему гравитационные силы, столь пренебрежимо малые при взаимодействии окружающих нас предметов, в космических масштабах приобретают столь решающую роль.

Очень наглядно разъясняет это Я. И. Перельман. Массы небесных тел безусловно огромны. Но ведь и расстояния между небесными телами колоссальны. Однако сила тяготения, как известно, пропорциональна произведению масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Масса же тела пропорциональна его объему и, следовательно, кубу линейных размеров. Поэтому, если размеры тел и их удаление увеличатся в n раз, то сила тяготения увеличится в $\frac{n^3 \cdot n^3}{n^2} = n^4$ раз! Это значит, что при

увеличении всех размеров Вселенной, скажем, в 2 раза силы тяготения в ней вырастут в 16 раз! Вот почему притяжение космических масс на больших расстояниях несравненно значительнее притяжения малых тел, находящихся друг возле друга.

Давно уже стало привычным и обыденным, что во всех календарях указывают фазы Луны, время и характер солнечных и лунных затмений. Астрономы выпускают точнейшие таблицы, в которых на много лет вперед указывается, в какой точке небосвода и в какой момент времени должны находиться планеты. С большой точностью предсказывается появление на небе многих комет («хвостовых звезд», как их называли раньше), пронизывающих солнечную систему по всем направлениям.

Происхождение планет

Может показаться, что мы знаем все о движении планет нашей солнечной системы. Однако это далеко не так. Ведь эта система когда-то возникла, развивалась, продолжает меняться и сейчас. Она имеет определенный возраст. Та неизменность, стабильность, которую на протяжении многих веков демонстрирует наша планетная система, объясняется лишь тем, что люди наблюдают ее относительно небольшой для ее возраста промежуток времени. Ведь даже если за человеком наблюдать, скажем, десятую долю секунды, может сложиться впечатление, что перед нами совершенно стабильная система.

Но что можно сказать о прошлом нашей солнечной системы? Этот вопрос издавна волновал умы ученых. Было предложено много гипотез, еще больше строилось догадок. Среди этих гипотез и догадок есть и наивные, и поэтические, и откровенно фантастические.

Мы не будем говорить о многочисленных догадках, относящихся к доньютоновскому периоду. Чаще всего они не являлись научными в современном смысле этого слова.

Прежде всего: откуда черпался строительный материал для солнечной системы? Точнее, речь идет о строительном материале именно для планет, так как большинство исследователей довольно едино-

душно сходятся на том, что Солнце старше своих спутников *).

Об этом с давних пор среди исследователей ведутся дискуссии. Две основные гипотезы, которые здесь выдвигались, имеют каждая своих горячих сторонников, и чаша весов попеременно склонялась то в одну, то в другую сторону, так что окончательный вывод пока еще сделать трудно.

Широко известна казавшаяся одно время почти очевидной гипотеза Канта — Лапласа, согласно которой вещество, образовавшее планеты,— это огромные раскаленные брызги, выплеснутые благодаря вращению с поверхности Солнца.

В современном варианте этой идеи строительный материал планет возник одновременно с Солнцем, отделившись от него в процессе образования Солнца из межзвездного газово-пылевого сгущения. Так, академик В. Г. Фесенков пишет: «Не успев сформироваться в звезду, т. е. продолжая интенсивно сокращаться, Солнце должно было оставить приблизительно в экваториальной плоскости значительное количество вещества, которое из-за чрезмерной скорости вращения не могло сосредоточиться в одном единственном теле». Существенную роль в этом процессе играли магнитные поля и корпускулярное излучение Солнца.

Противоположной является гипотеза захвата — предположение о том, что строительный материал для планет поступил из межзвездного пространства. Роль Солнца сводилась лишь к тому, чтобы захватить, удержать этот материал. Впервые такая мысль была четко сформулирована замечательным математиком, полярным исследователем, географом, астрономом и геофизиком — к этому списку можно было бы добавить еще не одну специальность,— человеком исключительной, энциклопедической образованности, Героем Советского Союза, академиком Отто Юльевичем Шмидтом.

*) Вопрос о возникновении звезд, в частности Солнца, представляет огромный самостоятельный интерес. Однако он еще далек от решения, и мы его здесь касаться не будем. Некоторые замечания по поводу процессов в звездах встретятся ниже в главах о ядерных силах и слабых взаимодействиях.

Окончательный выбор между этими основными гипотезами пока сделать нельзя, хотя большинство астрономов считает более вероятной первую гипотезу. Отметим другое: несмотря на существенное различие между теориями захвата и совместного образования, или истечения, у них есть много общего. Об этих общих моментах мы и поговорим.

Каким бы ни было происхождение сырья для планет, ему еще необходимо было пройти длинную цепь изменений, которая и привела к нынешнему состоянию солнечной системы.

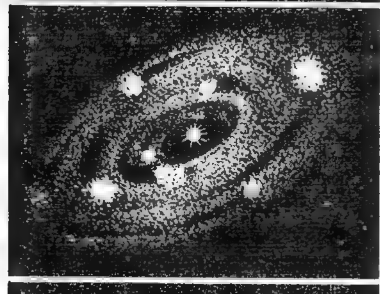
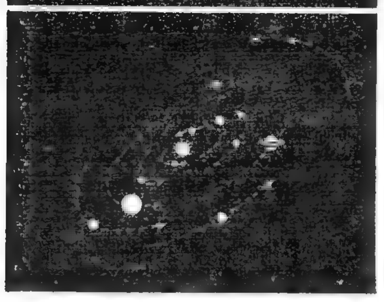
Какую же картину принять за исходную? Скорее всего, появлению планет предшествовало гигантское газово-пылевое облако, вращавшееся вокруг Солнца. Это предположение вполне согласуется с обеими гипотезами.

Итак, гигантское облако

Дальнейшая его судьба определялась, в основном, тремя обстоятельствами: гравитационным взаимодействием частиц с Солнцем и друг с другом, столкновением частиц и, наконец, действием солнечного излучения. Разумеется, нужно принимать во внимание и факт вращения. Теория происхождения солнечной системы О. Ю. Шмидта, его учеников и сотрудников (здесь мы уже можем говорить не просто о гипотезе, а именно о теории) прослеживает эволюцию околосолнечного облака вплоть до образования планет. Если пересказать словами то, о чем говорят сложные формулы, с которыми оперируют ученые, то получится следующая картина.

В течение миллионов лет удивительно меняется вид облака. Медленно, постепенно оно начинает сплющиваться, превращаясь в плоский вращающийся диск. Расстояния между частицами уменьшаются, и силы притяжения увеличиваются. Поэтому возникают многочисленные сгущения. Начинается так называемая гравитационная конденсация вещества. Процесс — аналогичный образованию капелек тумана из водяного пара. Но только здесь действуют не молекулярные силы, а гравитационные.

Проходят еще долгие вереницы тысячелетий, и столкновения частиц в пылевом сгущении приводят

к образованию сплошных тел размером в десятки или сотни километров. Так в диске образуется огромное количество сравнительно крупных тел, похожих на малые планеты-астероиды, заполняющие пространство между Марсом и Юпитером.

Двигаясь вокруг Солнца миллиарды лет, эти тела сталкивались между собой, дробясь или присоединяя к себе более мелкие тела и осколки крупных.

Те тела, которым удалось избежать дробления, начали расти быстрее других, «вычерпывая» вещество, рассеянное в пространстве. Становясь все больше, они сильнее притягивали и захватывали окружающие частицы. Но нужны космические промежутки времени, чтобы этот процесс конденсации завершился и на месте бесчисленных бесформенных глыб возникли планеты: с начала этого процесса прошло около 5 *миллиардов* лет.

Лишь вблизи самой тяжелой планеты — Юпитера — сильное возмущающее действие ее не позволило слиться глыбам воедино. Здесь мы имеем по сей день кольцо астероидов.

Теория Шмидта приблизила нас к пониманию многих закономерностей в строении солнечной системы. Главные из этих закономерностей таковы. Корни квадратные из радиусов орбит возрастают примерно в арифметической прогрессии (закон планетных рас-

стояний); орбиты очень близки к круговым — они являются слабо вытянутыми эллипсами; плоскости орбит мало наклонены друг к другу и к экваториальной плоскости Солнца. Из теории вытекает, что все планеты должны двигаться вокруг Солнца в одну и ту же сторону и что все планеты (за исключением Урана) вращаются в одну и ту же сторону вокруг своих осей.

Наконец, теория позволяет получить очень близкое к реальному распределение масс и плотностей объектов солнечной системы.

Одновременно с ростом планет гравитация должна все сильнее сжимать планеты, порождая колоссальные давления. При этом начинается разогревание планет. Однако существующая сегодня высокая температура земных недр объясняется не только как результат самого процесса образования Земли. Накопление тепла, выделяющегося при распаде радиоактивных элементов (урана, тория, радия и др.), также превращало постепенно Землю в гигантский тигель, в котором под давлением варились новые минералы, возникали те материалы, которые после выдавливания на поверхность и остывания одели корой Землю.

Но это еще не все. Когда в начале эволюции солнечной системы пылевые частицы собрались в плоский диск, этот диск стал непрозрачным. Поэтому солнечные лучи перестали проникать на периферию диска. Там воцарился космический холод. Температура упала до —270°C. Одновременно те части диска, которые примыкали к Солнцу, сильно прогревались его лучами.

В результате вблизи Солнца остались преимущественно тугоплавкие частицы, а газы, в первую очередь водород и гелий, вымораживались в холодной части диска — на его периферии. Стало быть, планеты, значительно удаленные от Солнца,— Юпитер и Сатурн — должны состоять в основном из водорода и гелия.

Ближайшие же к Солнцу планеты, в том числе и Земля, должны состоять, напротив, из тугоплавких веществ. Можно было бы подумать, что Уран, Нептун и Плутон содержат еще больше водорода, чем

Сатурн и Юпитер, но это не так. Процесс образования сгустков внутри пылевого облака на окраине солнечной системы протекал замедленно, так как плотность вещества там была малой. Возникновение многочисленных астероидных тел вблизи Солнца увеличило прозрачность облака к моменту, когда в далекой зоне этот процесс еще не развился. Солнечные лучи в этих условиях вызвали полное испарение водорода из пылинок и поверхностей относительно крупных частиц. Это и уменьшило содержание водорода у далеких планет.

Все это вытекает из теории. Ну, а как опыт? Подтверждает ли он выводы ученых? Конечно, нелегко взять «пробу почвы» с Юпитера. Такое время пока не наступило. Но можно поступить иначе. Зная массу и размеры планеты, можно оценить, какие химические элементы она содержит. Расчет показывает, что Юпитер содержит около 85 % водорода, а Сатурн — 80 % водорода и 18 % гелия. Итог таков: да, выводы теории верны, далекие планеты-гиганты действительно состоят из легких элементов, преимущественно из водорода.

Пусть только не возникает у читателя впечатление, что все ясно и никаких проблем не осталось. Конечно, многое стало более понятным, но как много еще загадок! И это касается не только каких-либо частностей, но и самых принципиальных моментов. Вспомните хотя бы тот же вопрос о предыстории нашей планетной системы. Согласно наблюдениям львиная доля массы солнечной системы сосредоточена в самом Солнце — 99,87 %, а вот момент вращения Солнца вокруг своей оси составляет лишь не более 2 % вращательного момента всей системы. Такое распределение моментов нетрудно получить, исходя из теории Шмидта, но при этом у облака, захваченного Солнцем, уже должен быть громадный вращательный момент. Был ли такой момент у захваченного облака — вопрос правомерный и обоснованный.

Вопросы остаются, и их еще не мало. Сама теория Шмидта не является в настоящее время общепринятой. Непрерывно выдвигаются все новые и новые гипотезы...

Тяготение на Земле

А теперь поговорим о том, что знакомо. Притяжение к Земле... Нужно быть поэтом, чтобы и здесь почувствовать прелесть новизны. Антуан де Сент-Экзюпери, французский летчик и поэт совершил вынужденную посадку в африканской пустыне и проснулся на гребне с лицом, обращенным к звездам. «Не сразу поняв, что за глубины передо мной, не находя корня, за который можно уцепиться, ни крыши, ни ветки дерева между мной и этими глубинами, я почувствовал головокружение, почувствовал, что уже оторвался и лечу в бездну.

Однако я никуда не упал. От затылка до пят я был связан с Землей. Я отдался ей всей тяжестью своего тела и ощутил какое-то успокоение. Сила тяготения показалась мне всемогущей, как любовь.

Я ощутил, что Земля меня подпирает, поддерживает, поднимает и уносит в ночное пространство. Я открыл, что тяжесть тела прижимает меня к планете, как на поворотах прижимает тело к машине; я наслаждался этой поддержкой, ее прочностью, ее надежностью и ощущал под тяжестью тела изогнутую палубу моего корабля...

Я чувствовал в своих плечах эту силу тяготения — гармоничную, постоянную, на веки веков одинаковую. Я был связан с родной Землей».

Да, только благодаря притяжению Земля стала для нас Матерью.

Если вдуматься, какую роль играют силы тяготения в жизни нашей планеты, то открываются целые океаны. И не только океаны явлений, но и океаны в буквальном смысле этого слова. Океаны воды. Воздушный океан. Без тяготения они бы не существовали.

Волна в море, движение каждой капли воды в питающих это море реках, все течения, все ветры, облака, весь климат планеты определяются игрой двух основных факторов: солнечной деятельности и земного притяжения.

Гравитация не только удерживает на Земле людей, животных, воду и воздух, но и сжимает их. Это сжатие у поверхности Земли не так уж велико, но роль его немаловажна.

Корабль плывет по морю. Что мешает ему утонуть — известно всем. Это знаменитая выталкивающая сила Архимеда. А ведь она появляется только потому, что вода сжата тяготением с силой, увеличивающейся с ростом глубины. Внутри космического корабля в полете выталкивающей силы нет, как нет и веса.

Сам земной шар сжат силами тяготения до колоссальных давлений. В центре Земли давление, по-видимому, превышает 3 миллиона атмосфер.

Под влиянием длительно действующих сил давления в этих условиях все вещества, которые мы привыкли считать твердыми, ведут себя подобно вару или смоле. Тяжелые материалы опускаются на дно (если можно так называть центр Земли), а легкие всплывают. Процесс этот длится миллиарды лет. Не окончился он, как следует из теории Шмидта, и сейчас. Концентрация тяжелых элементов в области центра Земли медленно нарастает.

Приливы и отливы

Ну, а как же проявляется у нас на Земле притяжение Солнца и ближайшего к нам небесного тела — Луны? Наблюдать это притяжение без специальных приборов могут только жители океанских побережий.

Солнце действует почти одинаковым образом на все, находящееся на Земле и внутри нее. Сила, с которой Солнце притягивает, например, москвича в полдень, когда он ближе всего к Солнцу, почти не отличается от силы, действующей на него в полночь. Ведь расстояние от Земли до Солнца в десять тысяч раз больше земного диаметра и увеличение расстояния на одну десятитысячную при повороте Земли вокруг своей оси на пол-оборота практически не меняет силы притяжения.

Поэтому Солнце сообщает почти одинаковые ускорения всем частям земного шара и всем телам на его поверхности.

Почти, но все же не совсем одинаковые. Из-за этой-то небольшой разницы возникают приливы и отливы в океане.

На обращенном к Солнцу участке земной поверхности сила притяжения несколько больше, чем это



необходимо для движения этого участка по эллиптической орбите, а на противоположной стороне Земли — несколько меньше. В результате согласно законам механики Ньютона вода в океане немного выпучивается в направлении, обращенном к Солнцу, а на противоположной стороне отступает от поверхности Земли. Возникают, как говорят, приливообразующие силы, растягивающие земной шар и придающие, грубо говоря, поверхности океанов форму эллипсоида.

Чем меньше расстояния между взаимодействующими телами, тем больше приливообразующие силы. Вот почему на форму мирового океана большее влияние оказывает Луна, чем Солнце. Мы говорили о Солнце просто потому, что Земля вращается вокруг него, и здесь легче понять причину деформации поверхности океанов.

Если бы не было сцепления между частями земного шара, то приливообразующие силы разорвали бы его.

Возможно, это произошло с одним из спутников Сатурна, когда он близко подошел к этой большой планете. То состоящее из осколков кольцо, которое делает Сатурн столь примечательной планетой, вероятно и есть обломки спутника.

Итак, поверхность мирового океана подобна эллипсоиду, большая ось которого обращена в сторону Луны. Земля вращается вокруг своей оси. Поэтому по поверхности океана навстречу направлению вращения Земли перемещается приливная волна. Когда она приближается к берегу — начинается прилив. В некоторых местах уровень воды поднимается до 18 метров. Затем приливная волна уходит и начинается отлив. Уровень воды в океане колеблется, в среднем, с периодом 12 ч. 25 мин. (половина лунных суток).

Эта простая картина сильно искажается одновременным приливообразующим действием Солнца, трением воды, сопротивлением материков, сложностью конфигурации океанических берегов и дна в прибрежных зонах и некоторыми другими частными эффектами.

Важно, что приливная волна тормозит вращение Земли.

Правда, эффект очень мал. За 100 лет сутки увеличиваются на тысячную долю секунды. Но, действуя миллиарды лет, силы торможения приведут к тому, что Земля будет повернута к Луне все время одной стороной и земные сутки станут равными лунному месяцу. С Луной это уже произошло. Луна заторможена настолько, что повернута к Земле все время одной стороной.

Чтобы «заглянуть» на обратную сторону Луны, пришлось посылать вокруг нее космический корабль.

Сформулировав свой знаменитый закон всемирного тяготения, Ньютон поставил перед наукой глубочайший вопрос: что такое гравитация, какова ее природа, как передается взаимодействие между тяготеющими массами.

Ньютон только *описал* гравитацию. Встала необходимость ее *объяснить.*

К рассказу о том, чего здесь удалось достигнуть, мы сейчас и перейдем.

4.

Поиски посредника

В одном из своих выступлений великий датский ученый Нильс Бор характеризовал теорию электромагнитных явлений как рациональный выход за рамки классической механики, «пригодный для того, чтобы смягчить контраст между действием на расстоянии и действием при соприкосновении».

Этот контраст еще сильнее в проблеме всемирного тяготения, хотя бы потому, что здесь сами расстояния нередко огромны.

Не каждый, вероятно, сможет разобраться в сложном механизме передачи усилия от руки по цепи к ведру, которое вытаскивают из колодца, но одно ясно для всех: если выпилить из этой цепи хотя бы одно звено, транспортировка силы от руки к ведру прекратится.

А вот гравитационные силы долгое время представлялись именно чем-то вроде удивительной цепи без единого звена. В науке это называется дальнодействием — действием на расстоянии без каких бы то ни было посредников.

Надо прямо сказать, что хотя физики временами «привыкали» к действию на расстоянии и находили его даже удобным, окончательно примириться с тем, что два тела через абсолютно ничем не заполненное пространство (или — это другая крайность — заполненное чем угодно) могут тянуть или толкать друг друга, ученые никогда не могли.

Поиски посредника при гравитационных взаимодействиях начались фактически одновременно с появлением в науке первых догадок об этих силах. Совершенно ясно понимал всю глубину физической проблемы и сам Ньютон.

Казалось бы, можно только удивляться тому, что, сформулировав количественно знаменитый закон о силе всемирного тяготения, Ньютон как будто бы подчеркнуто отвернулся от поисков механизма ее передачи (что дало повод многочисленным комментаторам причислить его к лагерю сторонников даль-

нодействия). Слово «отвернулся», конечно, неправильно отражает суть дела. А суть эта в следующих двух обстоятельствах.

Прежде всего, Ньютон не мог — просто в силу тогдашнего уровня науки — найти объяснение природы тяготения. Для этого потребовались такие фундаментальные сдвиги в науке, как возникновение понятия поля, о чем подробнее мы расскажем позднее, создание электродинамики и, наконец, теории относительности.

Вторая причина не так очевидна для сегодняшнего исследователя, хотя, вероятно, она сыграла далеко не последнюю роль. Причина эта касается самого понимания естественной науки, ее методов и ее задач.

Многим, вероятно, известна начавшаяся в семнадцатом веке борьба между картезианским и ньютонианским естественнонаучными мировоззрениями. Рене Декарт (Картезий), наряду с Гассенди, Бэконом Веруламским, Гоббсом, Локком и другими выдающимися мыслителями своего времени сумели — и это прежде всего, пожалуй, следует связать с именем Декарта — сделать решительный шаг вперед от господствовавшей в средние века схоластической философии с ее попыткой объяснять природу введением всевозможных «симпатий» и «антипатий», с ее идеей цели в явлениях. Однако, как ни велико было значение новой школы с характерным для нее союзом философии и естествознания, следует признать, что точные науки в современном смысле этого слова возникали нередко в борьбе с этой школой. Теоретические спекуляции Декарта при всем их захватывающем интересе были лишены одного существенного момента — они не только не опирались на опыт, но даже в известной мере противопоставлялись опыту. Именно это явилось поводом к ироническому замечанию Гюйгенса: «Декарт, по-видимому, собирается решать все вопросы физики, не заботясь о том, рассуждает ли он правильно или нет». Характерно в этой связи отношение Декарта к Галилею, которого французский мыслитель упрекал в том, что́ теперь обозначается словом «эмпиризм». Галилей, по мнению Декарта, не рассматривает первопричины вещей,

исследует только основания некоторых отдельных явлений и строит поэтому без фундамента.

«Hipotheses non fingo»

Ньютон шел по пути Галилея. Нужно было очистить науку от представлений, не продиктованных самой натурой, прервать бесконечную вереницу гипотез в духе картезианской философии и обратиться к изучению истинных законов природы. Перед вами подлинные слова Ньютона:

«Все, что не вытекает из явлений, является гипотезой. Гипотезам же нет места в экспериментальной физике. В последней выводят некоторые положения из наблюдаемых явлений и обобщают их путем индукции». Именно как отказ от отвлеченных спекуляций картезианской философии следует понимать изречение Ньютона «Hipotheses non fingo» — «Гипотез не сочиняю».

Резко отрицательное отношение Ньютона к «сочинительству гипотез» проявилось и в вопросе о природе тяготения. Было бы, однако, глубоко неправильным истолковать это как признание им идеи действия на расстоянии. Впрочем, с полной ясностью об этом высказывается сам Ньютон в письме к Бентли: «Я считаю нелепостью допущение, будто тело, находящееся на некотором расстоянии от другого тела, может действовать на него через пустое пространство без всякого посредства. Поэтому тяжесть должна вызываться каким-то действующим постоянно по определенным законам агентом».

Вопрос о природе этого агента оставался открытым. Не решили его и последовавшие дискуссии, с которыми связаны имена таких выдающихся ученых как Иоганн Бернулли, Гюйгенс, Лейбниц, Даниил Бернулли, Ломоносов, Эйлер.

Одно время имела хождение довольно наивная теория «истечений». Согласно этой теории пространство во всех направлениях пронизывается потоками материи (природа этих потоков не уточнялась). Если представить себе два расположенных неподалеку друг от друга тела, то они как бы загораживают одно другое от этих потоков. Получается так, что с внешней стороны потоки,— а значит, и давление — боль-

ше, чем на прилегающих сторонах. Этой-то разницей в давлениях и предлагалось объяснять всемирное тяготение. Вряд ли можно всерьез считать это объяснение удовлетворительным. Оно не только вводит весьма существенные гипотезы, но прямо приводит к выводам, никак не укладывающимся ни в какие экспериментальные рамки. Такое предположение, например, предсказывает несуществующие гравитационные тени или возникновение торможения планет, которого нет в действительности, и т. д.

Хороший вкус человечества

Проблема гравитации вновь — и на этот раз с принципиально новых позиций — была рассмотрена 234 года спустя после окончательного установления Ньютоном закона всемирного тяготения. Для того чтобы сделать здесь новый шаг, оказалось необходимым пересмотреть самые фундаментальные представления — представления о пространстве и времени. В сущности, продвинуться в понимании природы тяготения означало построить новое физическое мировоззрение. И сейчас, задним числом, мы можем поражаться, что такая гигантская работа — а это был, без преувеличений, переворот в физике — могла быть совершена практически одним человеком. Правда, этого человека звали Альберт Эйнштейн. Пожалуй, не будет преувеличением сказать, что ни одна физическая теория никогда не вызывала такого бурного, даже страстного интереса в самых широких кругах как физиков, так и не физиков, как теория относительности Эйнштейна. О ней писали не только в научных журналах и книгах. Не было в двадцатые годы, должно быть, ни одной газеты, ни одного журнала — включая детские журналы и журналы мод,— в котором бы не появилось отзвука этого чисто научного события. Правда, справедливости ради следует отметить, что число писавших о теории относительности всегда значительно превосходило число понимавших эту теорию. Но сам факт огромного интереса массы людей к проблемам гравитации, о которых вчера никто из них не задумывался, несомненно, весьма примечателен. В чем же здесь дело? Ведь созданная Эйнштейном общая теория относительности (о сущности этой теории нам

еще предстоит подробно говорить) не имела, да и сейчас не имеет никакого прикладного, практического значения. Она не помогла сконструировать ни одной машины, никого не накормила и не одела,— и тем не менее об Эйнштейне и его теории говорили, спорили и продолжают говорить больше, чем о любом другом ученом, может быть, и очень много сделавшем для удовлетворения практических нужд людей. Дело здесь, конечно, не в «моде» и не в рекламе, и не в том даже, что теория поразила людей своей смелостью и кажущейся парадоксальностью. По-видимому, определяющую роль сыграло здесь то, что теория относительности колоссально раздвинула научные горизонты, затронула фундаментальнейшие философские вопросы естествознания, ставя на повестку дня такие совершенно новые для тогдашней физики проблемы, как, например, проблему связи между пространством, временем и материей. По выражению Инфельда, человечество проявило хороший вкус, должным образом оценив все величие работ Эйнштейна по теории относительности.

Аксиомы Евклида и эксперимент

Однако прежде чем переходить к эйнштейновской трактовке тяготения, нам придется сделать отступление, чтобы познакомиться с некоторыми идеями, которые необходимо будет использовать в дальнейшем.

Нам придется поговорить о геометрии, точнее, о пространстве и времени. Казалось бы, что здесь общего с тяготением? Однако именно исследование физического пространства и времени позволило Эйнштейну по-новому осмыслить гравитацию. Но не будем забегать вперед.

Существует прекрасное изречение, принадлежащее Декарту: «Для того, чтобы познать истину, необходимо один раз в жизни все подвергнуть сомнению, насколько это возможно». Усомниться в том, что кажется само собой разумеющимся, казалось бы, никаких сомнений не допускающим! Суметь прорваться сквозь магический круг так называемых азбучных истин, которые часто только поэтому и кажутся очевидными, что над ними как следует не задумываются.



Много столетий школьники всех стран на уроках геометрии изучали — да и сейчас изучают — стройную систему евклидовых теорем. Все эти теоремы логически вытекают из простейших, таких наглядных, что они кажутся абсолютно достоверными, положений — знаменитых аксиом Евклида.

Евклидова геометрия вошла в физику целиком без каких бы то ни было оговорок и, фактически, без сомнений в необходимости проверки. Для Галилея и Ньютона пространство — это именно бесстрастный холодный фон. Время течет, как бы подчиняясь ходу каких-то абсолютных мировых часов, отсчитывающих секунды для всей Вселенной, причем на эти часы не может влиять материя и характер ее движения. Этот взгляд на пространство и время казался до начала нашего века незыблемым.

А можно ли проверять самые аксиомы Евклида? Можно ли, например, испытать их справедливость экспериментально? Здесь мыслимы два подхода. Конечно, могут найтись противники такой проверки. Они скажут, что геометрию, как и многие другие разделы математики, следует рассматривать как чисто логическое построение и на этом основании откажутся сравнивать ее положения с опытом. Такая точка зрения вполне правомерна во всех случаях, кроме одного — если вас интересует геометрия «настоящего», реального физического пространства. Но ведь нас-то сейчас интересуют не какие-либо абстрактные «математические» пространства, а именно реальное. А это значит, что последнее слово — и

решающее — принадлежит эксперименту. Этим очень многое сказано: эксперимент может и «не захотеть» втискиваться в рамки привычных нам представлений. И тогда уже возникнет необходимость пересмотреть многое из того, что казалось несомненным. Эксперимент, даже если он нацелен на изучение такого «нематериального» объекта, как пространство, в конце концов сводится к наблюдению именно за материей в различных ее формах. И это почти неизбежно (а дальше мы увидим, что слово «почти» излишне) должно привести к установлению связей между поведением материи, с одной стороны, и характером пространства — с другой. Звучит это, разумеется, на первый взгляд довольно фантастично, но если вдуматься, то более привычное нам представление о пространстве (и времени, добавим), как о каком-то бесстрастном, холодном фоне, на котором разыгрываются все события, предстанет перед нами как нечто еще более удивительное и странное.

И, наконец, еще одно. Если уж мы обращаемся к опыту, то нужно ясно отдавать себе отчет в том, что никакой эксперимент не может быть абсолютно точным. Ошибки (или, более деликатно выражаясь, погрешности) опыта, даже самого тонкого,— вещь неизбежная. Они обусловлены несовершенством приборов, случайными влияниями и, порой, самой физической сущностью явления. Об этом никогда не забывают в любом физическом исследовании. Будем же и мы постоянно иметь в виду, что какими бы строгими нам ни казались сегодня те или иные теории, в частности «физическая геометрия», о которой мы будем говорить ниже, они имеют приближенный характер, и каждый завтрашний день может внести в них существенные исправления.

Геометрия Лобачевского

Мысль о том, что евклидова геометрия не является единственной логически возможной, впервые четко была высказана в прошлом веке. Заслуга создания первой геометрии, отличающейся по своим постулатам от евклидовой, принадлежит великому русскому математику Лобачевскому. (Независимо неевклидова геометрия была разработана венгерским математиком Больяи.) Нам сейчас нелегко во всей

полноте оценить, какой научной самобытностью и смелостью должен был обладать этот замечательный казанский математик. Факты, однако, достаточно красноречивы. Среди современников оценить (или даже просто понять) идеи Лобачевского смогли, вероятно, три-четыре крупнейших европейских математика, не больше. В России Лобачевский был не понят настолько основательно, что в некрологе, например, много было сказано о его административной деятельности — и ни слова о созданной им новой геометрии. Даже такой передовой человек того времени, как Чернышевский, в письме к сыну выступает против идей Лобачевского, прибегая при этом, увы, к обывательским аргументам вроде того, что Лобачевский недаром, как вся Казань знает, верхом на свинье ездил, так что не приходится сомневаться, что он безумец (мы смягчаем выражения).

Но большие научные идеи не могут заглохнуть, даже если они в момент своего появления казались странными и парадоксальными. Более того, время становится само как бы одним из доказательств их непреложности. К концу девятнадцатого века существовал уже не один, а несколько вариантов неевклидовых геометрий (из них наибольшее значение для физики приобрела впоследствии геометрия Римана). Недоставало, однако, какого-то очень существенного толчка, чтобы эти чисто логические построения «ожили», приобретя трепетность актуальности.

Специальная теория относительности Эйнштейна

Нужен был эксперимент — необычный эксперимент, где объектом исследования была бы геометрия! О таком эксперименте думал Гаусс, келейно (и чуть ли не тайком — ведь из окружающих вряд ли кто-нибудь мог воспринять это иначе как нелепое чудачество) проверявший, равна ли сумма углов треугольника числу π. О нем говорил еще Лобачевский. И эксперимент, нанесший первый удар по привычным представлениям о пространстве и времени, появился. Но он на первый взгляд не имел никакого отношения к геометрии.

Целая серия независимых и разнородных опытов привела к выводу, поразившему физиков своей пара-

доксальностью: как бы ни двигался наблюдатель, измеряя скорость света, он получал один и тот же численный результат. Стоите ли вы на месте или пытаетесь догнать световой луч, скорость света оказывается абсолютно одинаковой. От светового луча нельзя убежать, как нельзя убежать от собственной тени. Ту же скорость света покажут ваши приборы, если вы мчитесь навстречу лучу.

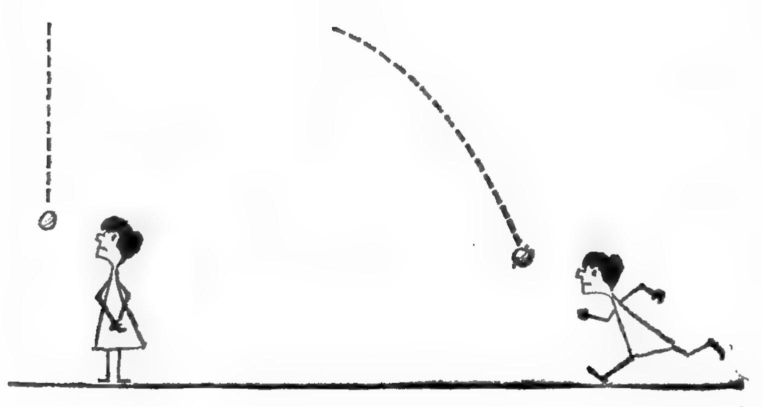
Это никак не укладывалось в рамки галилеево-ньютоновых представлений, свидетельствовало об их приближенности и настоятельно диктовало необходимость создания новой теории, которая позволила бы как-то осмыслить этот экспериментальный результат.

Решающий шаг в построении такой новой теории был сделан Эйнштейном.

Мы не можем здесь подробно рассказывать об эйнштейновской «специальной теории относительности». Нам нужны будут лишь некоторые ее конкретные результаты. Но прежде всего несколько слов о самой относительности.

Уже Галилей ясно понимал относительность механического движения. Нельзя сказать просто: «тело движется». Нужно указать, по отношению к каким другим телам (физики говорят — по отношению к какой системе отсчета) это движение определяется.

Внешний рисунок движения, конечно, различен в разных системах отсчета. Стенки вагона непод-



вижны по отношению к системе отсчета сидящих в нем пассажиров. И те же стенки движутся в системе отсчета, связанной с Землей. Траектория вертикально падающего камня выглядит по-разному с точки зрения неподвижного и быстро движущегося наблюдателя. Относительна скорость, относителен путь, пройденный телами, относительна траектория. Но есть и нечто, не зависящее от выбора системы отсчета,— сами законы движения, законы Ньютона. Во всех инерциальных системах эти законы абсолютно одинаковы *). Это значит, например, что, сидя в закрытой кабине, вы никакими механическими опытами не сможете определить, покоится ли кабина или же равномерно движется. Иначе об этом можно сказать так: все инерциальные системы отсчета равноправны. Нельзя выделить среди них абсолютно неподвижную, как нельзя найти и абсолютно движущуюся.

Эйнштейн обобщил этот принцип, распространив его не только на механику, но и на любые другие процессы. Экспериментальный факт постоянства скорости света был принят им как второе исходное требование, которому должна удовлетворять новая теория.

Для дальнейшего нам понадобится лишь одно из важных следствий теории относительности Эйнштейна, а именно, так называемое сокращение длин. Если измерить длину какого-то стержня в системе отсчета, где он покоится, а затем в другой системе, по отношению к которой этот стержень движется (в продольном направлении), то вторая длина окажется меньше, чем первая. Меняется сама геометрия, происходит изменение самого масштаба длин в направлении движения.

Заметим, кстати, что ход часов также существенно различен в различных инерциальных системах отсчета. Быстрее всего часы идут в той системе, относительно которой они покоятся. В любой другой системе время течет медленнее, и это (равно как и

*) Инерциальной системой с большой точностью можно считать систему отсчета, центр которой связан с Солнцем, а оси направлены на неподвижные звезды, или любую другую систему, которая движется с постоянной скоростью относительно этой системы.

сокращение длин) тем ощутимее, чем больше приближается скорость системы к скорости света. Кстати, именно потому, что механика Галилея — Ньютона родилась из наблюдений за движением сравнительно медленно перемещающихся тел (со скоростями много меньшими, чем скорость света, равная почти тремстам тысячам километров в секунду), оказалось возможным говорить о едином — абсолютном — времени и игнорировать сокращение длин.

Принцип эквивалентности

Однако какая связь может быть между относительностью длин и проблемой тяготения? Вот к этому вопросу мы сейчас и перейдем. Помнит ли читатель то, что в начале этой главы было названо «удивительным свойством гравитационных сил»?

Тяжелая и инертная массы равны!

Все тела, независимо от их природы и массы, приобретают под действием гравитационных сил совершенно одинаковые ускорения. Чем же это объясняется? Ведь нельзя же, в самом деле, ссылаться на случайные совпадения — уж слишком знаменателен сам факт.

Размышляя над этой проблемой, Эйнштейн обратил внимание на обстоятельство, которое, конечно, уже давно было прекрасно известно всем физикам, но которое никому не приходило в голову связать с гравитацией. Чтобы понять, в чем здесь дело, представьте себе, что вы находитесь в кабине свободно летящего (с выключенными двигателями) космического корабля. Наступило состояние невесомости. Все обстоит так, как если бы никакого тяготения вообще не было. Маятник замрет в отклоненном положении, выплеснутая из стакана вода большой сферической каплей повиснет в воздухе и рядом с ней застынут, будто подвешенные на невидимых нитях, все остальные предметы, независимо от их массы и формы. Вы подтолкнули тяжелую гирю и она плавно полетела, пересекая кабину. Если бы не сопротивление воздуха, ее движение было бы абсолютно равномерным.

И все это, заметьте, вовсе не требует того, чтобы сам космический корабль находился вдали от звезд

и планет, чтобы до него не дотягивалось их гравитационное воздействие. Невесомость возникает, например, на всех космических кораблях, совершающих полет вокруг земного шара. Ведь эти корабли, совершенно очевидно, находятся в сфере действия почти таких же гравитационных сил, что и на поверхности Земли. И космонавт не ощущает этих сил по следующей сравнительно простой причине. Движение космического корабля складывается из равномерного движения по горизонтали и ускоренного падения по вертикали, к центру Земли. О том, что заметить равномерное движение по поведению вещей внутри кабины невозможно, уже говорилось. Что же касается падения, то все предметы в кабине действительно падают под действием притяжения Земли. Но падают — напомним — с совершенно одинаковым ускорением. И точно с таким же ускорением падают пол, стенки и потолок кабины. Космонавт упал на один метр,— но ровно на метр ушло из-под него кресло. В результате он может свободно висеть над сиденьем.

Иначе говоря, гравитационные силы, явственно проявляющиеся в связанной с Землей системе отсчета, исчезают, если перейти в свободно падающую систему (только, разумеется, они исчезают не одновременно во всем пространстве вокруг Земли, а лишь в ограниченном пространстве кабины *)).

Слово «исчезают» мы употребили здесь не случайно. Действительно, никаким опытом, какие бы приборы мы ни применяли, какое бы явление ни рассматривали, невозможно обнаружить даже признаков тяготения, находясь в закрытой падающей кабине (физики часто говорят, следуя Эйнштейну, о «падающем лифте»).

Заметим попутно, что с этим явлением мы непрерывно сталкиваемся, даже и не садясь в кабину звездолета. Ведь наша Земля — это тоже огромный кос-

*) Было бы неправильно думать, что здесь стенки кабины играют какую-то роль гравитационных границ. Размеры области, в которой перестает ощущаться гравитация, определяются не размерами кабины, а расстояниями, на которые можно переместить любое тело, не заметив изменения гравитационных сил по величине и направлению.

мический путешественник, она вместе со всеми ее обитателями движется, направляемая притяжением Солнца. А мы этого притяжения не чувствуем. Причиной является не малость эффекта, а опять-таки тот факт, что движение Земли по ее орбите представляет собой, в сущности, непрерывное падение *).



Только приливы, о которых мы уже рассказывали, служат непрерывным зримым напоминанием о притяжении со стороны Солнца и Луны.

После всего сказанного встает вопрос: если за счет перехода в ускоренную систему отсчета можно убрать гравитационные силы, то нельзя ли таким же способом и создавать их? С одной стороны, как будто можно. Например, если механик будущего межзвездного корабля отрегулирует двигатель таким образом, чтобы за каждую секунду скорость возрастала примерно на десять метров в секунду, то команда окажется точно в таких же гравитационных условиях, как и все люди на Земле. С другой стороны, однако, невольно возникают сомнения. Так и кажется, что здесь какой-то суррогат тяготения. Но любая подделка, как бы она ни была совершенна, чем-нибудь отличается от настоящего, а у нас ни в чем, буквально ни в чем нет никаких отличий. Ведь основное свойство сил тяготения — то, что они совер-

*) Движение кораблей-спутников вокруг Земли и Земли вокруг Солнца в несущественных деталях не похоже на простое падение. В последнем случае движение прямолинейно. Это различие можно обнаружить на опыте, поставленном внутри кабины.

шенно одинаково ускоряют любые тела. Это свойство в ускоренно движущейся системе обеспечивается, если так можно выразиться, автоматически. У всех тел с точки зрения такой системы появляются добавочные одинаковые ускорения, равные по величине и противоположные по направлению тому ускорению, которое сама эта система имеет с точки зрения инерциальных систем.

Итак, взвесив все обстоятельства, мы убеждаемся, что можно отважиться на следующее исключительно важное утверждение: в каждой достаточно малой *) области пространства *никакими физическими экспериментами невозможно отличить движение тел под действием гравитационных сил от их движения в соответствующим образом подобранной ускоренной системе*. Или, более коротко: тяготение в каждой точке пространства эквивалентно соответствующим образом подобранному ускорению системы отсчета. Эквивалентность, по Эйнштейну, касается не только механических движений, но вообще любых процессов.

Мы пришли, таким образом, к знаменитому принципу эквивалентности Эйнштейна, являющемуся одной из самых глубоких гипотез в современной теории,— принципу, который, как мы сейчас убедимся, с неизбежностью приводит к установлению теснейшей связи между гравитацией и геометрией.

В поле тяготения геометрия не может быть евклидовой

Необходимость такой связи очевидна хотя бы из такого простого рассуждения: в привычной нам геометрии Евклида (по причинам, которые нам станут понятными позднее, ее называют «плоской» геометрией) отношение длины окружности к диаметру равняется числу «пи» ($\pi = 3,14\ldots$). Его можно получить, разделив число очень маленьких стержней, уложенных вдоль окружности, на число стержней,

*) Область пространства считается здесь малой, если гравитационное воздействие не изменяется при перемещении тела внутри этой области. Ясно, например, что огромный зал Дворца спорта в Лужниках с этой точки зрения с большим запасом точности — достаточно малая область. В то же время вся Земля уже не может составить такую область — здесь нельзя игнорировать изменения гравитационных сил по величине и по направлению.

уложенных вдоль диаметра. А теперь посмотрим, чему равно это отношение с точки зрения системы отсчета, вращающейся вместе с окружностью. Пусть экспериментатор в этой системе отсчета начнет укладывать те же самые стержни вдоль окружности и диаметра. Результат, к которому он придет, можно установить, рассматривая этот измерительный процесс с точки зрения инерциальной системы. Каждый стержень на окружности согласно теории относительности сокращается, в то время как стержни вдоль диаметра не должны испытывать сокращения. Ведь их направления перпендикулярны скорости движения. Значит, движущийся экспериментатор уложит по окружности большее число стержней, чем неподвижный, а вдоль диаметра — то же самое число. Поэтому отношение длины окружности к диаметру во вращающейся системе отсчета больше π. Но ведь это возможно лишь в том случае, когда *изменилась сама геометрия*, если она перестала быть евклидовой! И, что очень интересно, характер новой геометрии однозначно определяется тем ускорением, с каким движутся отдельные точки системы отсчета.

Сделаем теперь еще один шаг — и мы у цели. Приняв принцип эквивалентности, мы тем самым согласились считать, что все результаты, которые получаются в ускоренно движущихся системах, будут иметь место в инерциальных системах при наличии тяготения. Но если так, то само тяготение можно рассматривать как отступление от евклидовой геометрии, «искривление пространства», как мы будем для краткости говорить в дальнейшем.

Вывод, самый, пожалуй, удивительный из всех, которые знала физика за все время своего существования, сделан: тяготение связано с искривлением пространства! Роль того агента, о котором говорил в свое время еще Ньютон, который картезианцами связывался с таинственными вихрями, существующими между телами, принадлежит, оказывается, свойствам самого пространства, его геометрии.

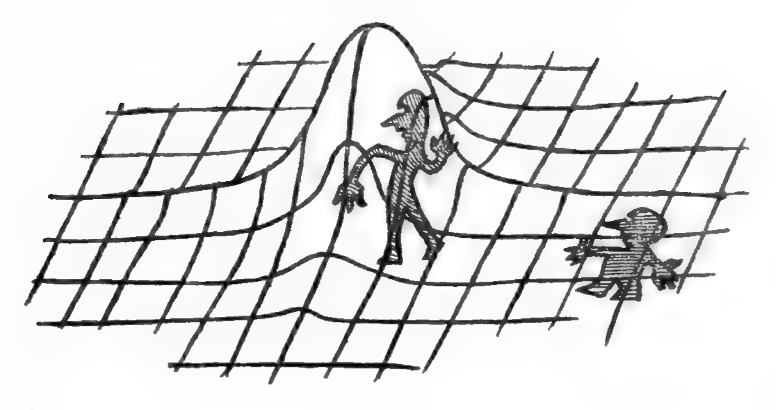
Попытаемся на простейшей модели внести в этот абстрактный и чрезвычайно сложный вывод хотя бы некоторый элемент наглядности.

Геометрия двумерных существ

Представьте себе растянутую резиновую пленку с нанесенной на ней сеткой. Она будет играть роль координатной сетки. Это — модель пространства (но только не трех, а двух измерений), обладающего евклидовыми свойствами. Если представить себе, что на этой пленке обитают какие-то фантастические двумерные существа, обладающие к тому же интеллектом, то среди них рано или поздно должен появиться свой Евклид, который сформулирует основы геометрии, которые будут точно такими же, как обычная геометрия Евклида на плоскости.

Но вот мы надавили пальцем на какой-то участок пленки. Этот участок растянулся, изменились углы между линиями, отношение длины окружности к диаметру перестало быть равным π, сумма углов треугольника сделалась отличной от π,— одним словом, произошло то, что двумерные геометры с неизбежностью должны истолковать как нарушение евклидовой геометрии, как искривление пространства. Заметьте, все эти явления сказываются тем сильнее, чем ближе участок пленки к возмущающему телу — в нашем примере к оказывающему давление пальцу.

Может появиться соблазн продолжить аналогию с пленкой еще дальше. В самом деле, почему бы не сравнить действие пальца, надавливающего на пленку, с действием масс, вызывающих тяготение. Тем



более, что от давления пальца в одном месте пленки во всех других местах появляются соответствующие упругие натяжения, которые так и хочется сравнить с гравитационными силами (они, кстати, даже убывают с расстоянием почти так же, как тяготение). Однако эту аналогию нельзя считать очень глубокой. Ни с какой упругостью гравитация, конечно, не связана. Сходство начинается и кончается чисто геометрической стороной дела.

Что такое прямая линия?

Можно подойти к необходимости связать геометрию с тяготением и с другого конца. Среди аксиом Евклида есть одна, которая гласит: через две точки можно провести только одну прямую линию. Это, так сказать, одна из тех азбучных истин, которые, следуя Декарту, мы тоже попытаемся подвергнуть сомнению. Прямая линия... Вдумайтесь: а что это, собственно, такое — прямая линия?

Конечно, было бы наивно ответить, что прямая линия — это линия, проведенная по линейке. Нужно еще как-то предварительно проверить, не искривлена ли сама линейка.

Может быть, некоторые из читателей вспомнят, что прямая — кратчайшее расстояние между двумя точками. Но им сразу же придется подумать над тем, как, собственно, измерять расстояния. Для этого опять потребуется линейка, причем *прямая* линейка. Получается порочный круг.

Можно было бы, конечно, попытаться говорить о натянутых нитях. Не даром же говорят: «...прямой как струна». Но это завело бы нас в такие дебри проблем теории упругости, которые лучше обойти стороной.

Есть и еще один — простейший — способ определения прямых. Человек уже давным-давно пользуется световыми лучами как идеально прямыми линиями. Что вы делаете, чтобы проверить, не искривилась ли линейка? Подносите ее к глазам и смотрите вдоль ребра, т. е. сравниваете ребро линейки со световым лучом. По существу, где бы ни применялась геометрия в практике людей, а это делается буквально на каждом шагу, используется этот же принцип. Он так прост, что над ним не задумываются.

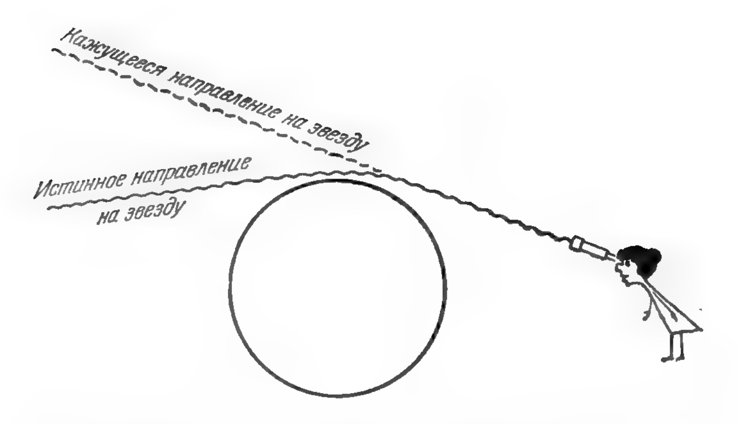
Прост ли? Как практический способ — конечно. Но за этой простотой скрывается очень глубокий физический смысл.

Чтобы применять какой-либо эталон, нужно быть уверенным, что на него не оказывает действия окружающая среда, что он стабилен. Как показывает глубокий теоретический анализ, световой луч в высочайшей степени обладает такой стабильностью: он не испытывает никаких воздействий *). Впрочем, это не совсем точно. Есть одна сила, которая влияет и на свет. Замечательно, что это — гравитация. Да, именно сила *всемирного* тяготения еще раз оправдывает свое название: влияние гравитации на свет теперь доказано прямыми опытами.

Искривление световых лучей

Астрономы, наблюдая звезды, точно определяют их положение на небосводе и наносят на звездную карту. И недаром звезды называются неподвижными. Звездная карта, составленная сотню лет назад, с высокой степенью точности совпадает с сегодняшней. К этому все, казалось, привыкли. Но вот Эйнштейн выступил с удивительным предсказанием: во время солнечного затмения все звезды, расположенные вблизи затененного Луной солнечного диска, должны смещаться, как бы отодвигаться от Солнца. Такое смещение действительно было обнаружено. Простое и наглядное объяснение этого явления появится сразу, если принять, что световые лучи отклоняются под влиянием гравитации в сторону Солнца. Действительно, пусть луч от звезды, идущий к Земле, проходит вблизи Солнца (ясно, что притяжение Солнца скажется заметно лишь на малых расстояниях) и испытывает отклонение. Земной наблюдатель, который увидел бы звезду в центре окуляра, если бы луч света не проходил возле Солнца, теперь увидит ее в центре поля зрения окуляра, только немного отклонив телескоп от Солнца. Эйнштейновская теория хорошо количественно и, хочется сказать, естественно описывает отклонение

*) Сказанное не противоречит явлению отражения и преломления волн: эти процессы сводятся к многократным поглощениям и испусканиям волн. Между испусканием же и поглощением световая волна действительно не испытывает воздействий.



световых лучей под влиянием гравитации, предсказывая углы отклонения, очень близкие к тем, которые измеряют астрономы.

Мы не можем входить здесь в детали подтверждающих это количественных расчетов. Попытаемся, однако, показать, что если верен эйнштейновский принцип эквивалентности, то световой луч с неизбежностью должен отклоняться. Начнем со сравнения. Представьте себе, что вы едете в поезде. Идет дождь, и капли прочерчивают полоски на стеклах. Если поезд движется равномерно, то полоски будут прямыми. При ускоренном же движении они изогнутся (искривление!). Любые другие струйки будут также искривляться с точки зрения пассажиров набирающего скорость поезда. Не составляют исключения и световые струи.

А теперь вспомним, что в согласии с принципом Эйнштейна ускорение эквивалентно наличию тяготения. Следовательно, искривление световых лучей (и, добавим, лучей, образованных потоками любых частиц) под влиянием тяготения неизбежно.

Как была «взвешена» электромагнитная волна

Второй опыт, доказывающий влияние гравитации на свет, имеет вполне земной характер и масштабы. Читатель знает, что для того, чтобы услышать передачу радиостанции, нужно настроить приемник на ее волну. А вот такая мысль, вероятно, возникала не у всех: не нарушится ли настройка, если взоб-

раться с приемником на высокую гору или опуститься в низину? «Конечно, не нарушится»,— скажете вы. Какую же роль может играть такой подъем или спуск?

Вот какую: сначала настройка велась на одном уровне, а потом, когда приемник был поднят, электромагнитные волны от передатчика к приемнику пойдут вверх, преодолевая силы земного тяготения. Опыт показывает, что действительно они при этом будут терять энергию и одновременно будет уменьшаться их частота. Конечно, у обычных приемников и передатчиков настройка настолько груба, что заметить такое явление невозможно. Однако недавно физикам удалось отыскать сверхточно настроенные приемники и передатчики. Не думайте, что речь идет об устройствах обычного радиотехнического типа; в данном случае и приемник, и передатчик представляли собой особые кристаллы, в состав которых входили атомы с ядрами, способными испускать и поглощать электромагнитные волны очень большой энергии — так называемые γ-кванты с очень точно фиксированной частотой.

В опытах Мёссбауэра, поставленных по этой схеме, оказывалась достаточной разность уровней в десяток метров, чтобы заметить «ускорение» *) падающего вниз луча. Эти, рекордные по точности опыты являются прямым доказательством того, что свет «весит», что на электромагнитные волны, как и на все другие виды материи, оказывает влияние гравитация.

Спектральные линии света, идущего от звезд, немного сдвинуты в сторону красного конца спектра, причем этот сдвиг тем заметнее, чем больше масса звезды. Это, в сущности, тот же опыт Мёссбауэра, только в космическом масштабе. Он иногда применяется для измерения массы звезд. Этот эффект, как и искривление лучей, проходящих вблизи массивных тел, был предсказан Эйнштейном.

*) Конечно, это «ускорение» не надо понимать в обычном механическом смысле слова. Имеется в виду не увеличение скорости света — она в пустоте (в воздухе практически то же самое) строго постоянна,— а рост энергии.

Урок геометрии на фантастической планете

А теперь сопоставим все сказанное выше. Мы установили, что лучшим из эталонов прямой является световой луч в пустоте. В то же время этот луч под влиянием гравитации — только гравитации — отклоняется или, если хотите, искривляется. Вот мы опять, но уже с новых позиций, пришли к тому же результату, что и раньше. Только тогда мы говорили об искривленном пространстве, а теперь употребляем выражение: искривленные прямые.

Вывод о неразрывной связи между тяготением и искривлением пространства, сделанный Эйнштейном, явился в свое время буквально ошеломляющим. Слишком уж неожиданным и значительным он казался всем, кто задумывался над проблемой тяготения. Но, пожалуй, прежде всего неожиданным и необычным.

Вспомним опять школьные уроки геометрии. Ведь учитель не упоминал там ни о каком тяготении. Он не говорил, например, что через две точки при определенной величине гравитационных сил можно провести только одну прямую! Да, не говорил, но это лишь потому, что геометрия Евклида выросла из практики людей, живущих на Земле, где влияние тяготения на геометрию настолько мало, что даже сейчас, используя современное оборудование, очень трудно — почти невозможно — заметить неточность этой геометрии.

А теперь мысленно перенесемся на такую планету (допустим, что она существует), где сила тяготения в десятки миллионов раз больше, чем у нас. Можно придумать такие условия, что направленный горизонтально луч света не сможет преодолеть притяжения и будет огибать планету параллельно ее поверхности как спутник. И если далее, дав волю фантазии, представить себе, что на этой планете есть школы, то на уроках геометрии учитель должен бы, вероятно, говорить примерно следующее: «Свет в пустоте движется по прямой. Представим себе сильнейший прожектор, подвешенный над одним из полюсов и посылающий пучок лучей по горизонтали. Допустим, что нет ни рассеяния, ни преломления,

ни поглощения света. Тогда лучи, пройдя над поверхностью планеты, дойдут до второго полюса и, миновав его, вернутся — только с другой стороны — к прожектору. Немного повернув прожектор, вы получите другой луч — другую прямую, также проходящую через оба полюса. И таких прямых можно получить сколько угодно. Они очень похожи на меридианы, соединяющие полюса. Итак, дети, вы видите, что через две точки — в данном случае через два полюса — можно провести бесчисленное множество прямых линий. Запомните эту аксиому — она является одной из основ геометрии. Сообщу вам, дети, не вдаваясь в подробности, что математики додумались до такой геометрии, где через две точки проходит только одна прямая,— но вряд ли это может найти какое-либо практическое применение».

Ученики выучат это положение, будут, отвечая урок, говорить, что параллельные линии пересекаются, что сумма углов треугольника не равна числу π и после окончания школы в своей практической деятельности никогда не столкнутся ни с какими геометрическими парадоксами.

Можно было бы еще много рассказывать об этой удивительной планете, где, например, каждый, в принципе, может безо всяких зеркал увидеть собственный затылок, но, пожалуй, пора вернуться на Землю. Наше воображаемое путешествие было поучительным: мы убедились еще раз, что привычное не обязательно должно быть всеобщим и единственно возможным. Оказывается, даже геометрия не составляет исключения.

Еще одна порция сомнений

Нам остается добавить еще лишь одно. Вдумчивый читатель мог бы заметить, что во всех наших рассуждениях о световых лучах есть некий элемент наивного практицизма. На практике,— говорим мы,— световой луч является эталоном прямой линии, а поскольку он искривляется гравитацией, то, значит, сама гравитация связана с искривлением геометрии. Не слишком ли сильное ударение мы делали на словах «на практике»?

Ведь таким способом, ссылаясь на «практику», можно оказаться в сетях самых примитивных про-

тиворечий. «На практике» тот кусок Земли, который охватывает наш взгляд, является примерно плоским. Но ведь мы же не можем из этого сделать вывод, что вся Земля — плоская. «На практике» ложечка в стакане с чаем кажется изломанной, но ведь мы умеем, учитывая преломление света на границе между водой и воздухом, восстановить истинную картину. Нельзя ли аналогичным образом учесть и то «преломление» световых лучей, которое вызывается тяготением, и ввести соответствующую поправку?

Но что значит — ввести поправку? У нас есть способы убедиться, что Земля шарообразна, а ложечка в стакане не переломлена. Способы экспериментальные. Например, если подняться, как это было сделано космонавтами, на достаточно большую высоту, то с этой новой точки зрения шарообразность Земли становится заметной на глаз. А где же найти ту «точку зрения», которая позволила бы отсепарировать геометрию от тяготения? Какой опыт мог бы доказать, например, что «на самом деле» прямые остаются прямыми, пространство — «плоским», а искривляются лишь световые лучи? Ведь для такого опыта потребовался бы какой-то абсолютный эталон прямизны. Но его-то как раз и нет!

Но суть даже не в этом. Внимательный читатель мог бы задать еще и такой вопрос. Представим себе на минуту, что вообще никакого эталона прямых линий не существует, что, например, на Земле все линейки — кривые и мы не умеем их спрямить. Что же — разве от этого наша земная геометрия станет менее похожа на евклидову? Разве от того, что мы пользуемся не привычной прямоугольной декартовой координатной сеткой, а криволинейной географической сеткой параллелей и меридианов, сумма углов треугольника как-то меняется? Да конечно же нет! Так в чем же дело?

Дело, разумеется, опять в принципе эквивалентности. Вспомните рассуждения о вращающемся диске, с которого мы начинали наш рассказ *). Ведь

*) Упомянем, что пример с диском позволяет также показать влияние тяготения на ход часов. Действительно, чем дальше расположены часы от центра вращающейся системы, тем больше их скорость, а значит, тем медленнее они идут. Но, с другой стороны,

здесь существенно не то, что какие-то прямые линии стали кривыми, а то, что нарушены сами геометрические соотношения: отношение длины окружности к ее радиусу стало иным, чем то диктуется геометрией Евклида. И в силу принципа эквивалентности тот же эффект должен производиться силами всемирного тяготения (конечно, соответственно подобранными).

А искривление светового луча, которое мы использовали для наглядной иллюстрации того, что собой представляет физическая геометрия,— это не причина, а следствие искривления геометрии.

«Притча Эддингтона»

Вернемся теперь еще раз к закону всемирного тяготения. Мы так долго искривляли пространство, что может показаться, будто забыто, ради чего, собственно, и пошел весь разговор. Нет, конечно, не забыто. Более того, все предыдущее, по существу, и является новым толкованием тяготения.

Хорошо это иллюстрирует притча английского физика Эддингтона из книги «Пространство, время и тяготение», которую мы позволим себе пересказать (с небольшими комментариями в скобках).

«В океане, имеющем только два измерения, жила однажды порода плоских рыб. Было замечено, что рыбы вообще плавали по прямым линиям, пока они не встречали на своем пути явных препятствий. Это поведение казалось вполне естественным. Но в океане была таинственная область; когда рыбы в нее попадали, они казались заколдованными; некоторые проплывали через эту область, но изменяли направление своего движения, другие без конца кружились по этой области. Одна рыба (почти Декарт) предложила теорию вихрей; она говорила, что в этой области находятся водовороты, которые заставляют кружиться все, что в них попадает. С течением времени была предложена гораздо более со-

ускорение также увеличивается с ростом расстояния от центра. На основе принципа эквивалентности мы, стало быть, сразу сможем сделать вывод: чем сильнее тяготение в том месте, где находятся часы, тем медленнее они идут. Соответственно можно говорить об искривлении времени в том же смысле, что и об искривлении пространства.

вершенная теория (теория Ньютона); говорили, что все рыбы притягиваются к очень большой рыбе — рыбе-солнцу, дремлющей в середине области,— и этим объясняли отклонение их путей. Вначале эта теория казалась, быть может, немного странной; но она с удивительной точностью подтвердилась на самых разнообразных наблюдениях. Было найдено, что все рыбы обладают этим притягивающим свойством, пропорциональным их величине; закон притяжения (аналог закона всемирного тяготения) был чрезвычайно прост, но, несмотря на это, он объяснял все движения с такой точностью, до которой никогда раньше не доходила точность научных исследований. Правда, некоторые рыбы, ворча, заявляли, что они не понимают, как возможно такое действие на расстоянии; но все были согласны, что это действие распространяется при помощи океана и что его легче будет понять, когда лучше будет изучена природа воды. Поэтому почти каждая рыба, которая хотела объяснить притяжение, начинала с того, что предполагала какой-нибудь механизм, при помощи которого оно распространяется через воду.

Но была рыба, которая посмотрела на дело иначе. Она обратила внимание на тот факт, что большие рыбы и малые двигались всегда по одним и тем же путям, хотя могло казаться, что для отклонения большой рыбы с ее пути потребуется бóльшая сила. (Рыба-солнце сообщала всем телам одинаковые ускорения.) Поэтому она вместо сил стала подробно изучать пути движения рыб и таким образом пришла к поразительному решению вопроса. В мире было возвышенное место, где лежала рыба-солнце. Рыбы не могли непосредственно заметить этого потому, что они были двумерны; но когда рыба в своем движении попадала на склон этого возвышения, то хотя она старалась плыть по прямой линии, она невольно немного сворачивала в сторону. (Когда путешественник передвигается по левому склону горы, он должен сознательно уклоняться влево, если он хочет сохранять свое первоначальное направление по компасу.) В этом состоял секрет таинственного притяжения или искривления путей, которое происходило в таинственной области.

Между тем, о чем рассказывается в этой притче, и тем, что нас интересует, нет, конечно, полной аналогии, потому что то возвышение, о котором в ней говорится, относится только к пространству, в то время как нам приходится иметь дело с «возвышением» в пространстве — времени. (В нашей книге мы не можем останавливаться на этом подробнее.) Но эта притча показывает, как кривизна мира, в котором мы живем, может дать иллюзию силы притяжения, и мы видим, что эффект, подобный притяжению, есть единственное, в чем такая кривизна может проявиться».

Коротко это можно формулировать следующим образом. *Так как гравитация одинаковым образом искривляет пути всех тел, мы можем считать тяготение искривлением пространства — времени.* Тяготение — «alter ego» *) искривления геометрии.

С кривизной пространства — времени можно не связывать ничего, кроме искривления пространственно-временны́х путей (так называемых мировых линий **)) всех без исключения тел.

Движение перигелия Меркурия

Мы провели длинные рассуждения и пришли к существенно новому пониманию тяготения. Разумеется, это само по себе важно и интересно. Но, может быть, ничего существенного нам это не дает и на «выходе» остается все тот же старый добрый ньютоновский закон?

Конечно, это не так. Речь идет не только о новом осмысливании старых истин, но и о принципиальных обобщениях, о новых эффектах.

О том, что теория Эйнштейна количественно верно описывает отклонение световых лучей под влиянием тяготения, и об эффекте Мёссбауэра мы уже говорили. Можно упомянуть и об успешном объяснении дви-

*) Другой я.

**) Под мировой линией понимается кривая, изображающая зависимость координат движущейся точки от времени. Для простейшего одномерного движения — движения вдоль пространственной прямой — мировая линия изображает зависимость единственной координаты от времени. При равномерном движении мировая линия будет прямой; при ускоренном движении она искривляется.

жения перигелия планет, особенно Меркурия. Имеется в виду следующее. Подсчет по законам ньютоновской механики приводит к выводу, что орбиты всех планет должны быть эллипсами, положение которых в пространстве неизменно. Наблюдения же показывают, что эти орбиты медленно поворачиваются. Наиболее заметно это у Меркурия, ближайшей к Солнцу планете, испытывающей, следовательно, наибольшее гравитационное влияние. Расчет, основанный на эйнштейновской теории тяготения, дает хорошее количественное описание этого явления.

Гравитационные волны

Все, о чем мы говорили выше, имеет, если угодно, характер малых поправок. Существует, однако, и нечто принципиально новое, что следует из эйнштейновской трактовки тяготения. В первую очередь здесь нужно отметить вывод о конечности скорости распространения гравитации.

В ньютоновском законе всемирного тяготения о времени передачи взаимодействия ничего не говорится. Неявно предполагается, что оно осуществляется мгновенно, какими бы большими ни были расстояния между взаимодействующими телами. Такой взгляд вообще типичен для сторонников действия на расстоянии. Из теории Эйнштейна вытекает, что тяготение передается от одного тела к другому с такой же скоростью, что и световой сигнал. Если какое-то тело сдвигается с места, то вызванное им искривление пространства и времени меняется не мгновенно. Сначала это скажется в непосредственной близости от тела, потом изменение будет захватывать все более и более далекие области, и наконец во всем пространстве установится новое распределение кривизны, отвечающее измененному положению тела.

И вот здесь мы подходим к проблеме, которая вызывала и продолжает вызывать наибольшее число споров и разногласий — проблеме гравитационного излучения.

Может ли существовать тяготение, если нет создающей его массы? Согласно ньютоновскому закону — безусловно нет. Там такой вопрос бессмысленно даже ставить. Однако, как только мы согласились, что гравитационные сигналы передаются

хотя и с очень большой, но все же не бесконечной скоростью, все радикально меняется. Действительно, представьте себе, что сначала вызывающая тяготение масса, например шарик, покоилась. На все тела вокруг шарика будут действовать обычные ньютоновские силы. А теперь с огромной скоростью удалим шарик с первоначального места. В первый момент окружающие тела этого не почувствуют. Ведь гравитационные силы не меняются мгновенно. Нужно время, чтобы изменения в кривизне пространства успели распространиться во все стороны. Значит, окружающие тела некоторое время будут испытывать прежнее воздействие шарика, когда самого шарика уже нет (во всяком случае на прежнем месте).

Получается так, что искривления пространства *) обретают определенную самостоятельность, что можно вырвать тело из той области пространства, где оно вызывало искривления, причем так, что сами эти искривления, хотя бы на больших расстояниях, останутся и будут развиваться по своим внутренним законам. Вот вам и тяготение без тяготеющей массы! Можно пойти и дальше. Если заставить наш шарик колебаться, то, как получается из эйнштейновской теории, на ньютоновскую картину тяготения накладывается своеобразная рябь — волны тяготения. Чтобы лучше представить себе эти волны, вернемся опять к нашей модели — резиновой пленке. Если не только нажать пальцем на эту пленку, но одновременно совершать им колебательные движения, то эти колебания начнут передаваться по растянутой пленке во все стороны. Это и есть аналог гравитационных волн. Чем дальше от источника, тем такие волны слабее.

А теперь в какой-то момент перестанем давить на пленку. Волны не исчезнут. Они будут существовать и самостоятельно, разбегаясь по пленке все дальше и дальше, вызывая на своем пути искривление геометрии.

Совершенно так же волны искривления пространства — гравитационные волны — могут существо-

*) Точнее, везде нужно говорить об искривлении пространства — времени.

вать самостоятельно. Такой вывод из теории Эйнштейна делают многие исследователи.

Конечно, все эти эффекты очень слабы. Так, например, энергия, выделяющаяся при сгорании одной спички, во много раз больше энергии гравитационных волн, излучаемых всей нашей солнечной системой за то же время. Но здесь важна не количественная, а принципиальная сторона дела.

Одно время научная общественность была взволнована сообщением о том, что американскому исследователю Веберу удалось зарегистрировать гравитационные волны. Его установки, в принципе, были очень просты: массивные, примерно в одну тонну, алюминевые цилиндры полутора метров длиной, устанавливались под землей. Если, рассуждал Вебер, гравитационная волна налетит на такой цилиндр, он должен начать вибрировать. Чтобы избежать случайных эффектов, брались два цилиндра на значительном расстоянии один от другого и учитывались только совпадающие их колебания. Однако Веберу, как показали более точные измерения, проведенные, в частности, в Московском университете, по-видимому, не удалось избавиться от «паразитных» влияний. Приемники гравитационных волн пока еще не достигли необходимой чувствительности.

Сторонники гравитационных волн — а они, по-видимому, сейчас в большинстве — предсказывают и еще одно удивительное явление: превращение гравитации в такие частицы, как электроны и позитроны (они должны рождаться парами), протоны и антипротоны и т. д. (Иваненко, Уиллер и др.).

Выглядеть это должно примерно так. До некототорого участка пространства дошла волна тяготения. В определенный момент это тяготение резко, скачком, уменьшается и одновременно там же появляется, скажем, электронно-позитронная пара. То же можно описать и как скачкообразное уменьшение кривизны пространства с одновременным рождением пары.

Есть много попыток перевести это на квантовомеханический язык. Вводятся в рассмотрение частицы — гравитоны, которые сопоставляются неквантовому образу гравитационной волны. В физической

литературе имеет хождение термин «трансмутация гравитонов в другие частицы», причем эти трансмутации — взаимные превращения — возможны между гравитонами и любыми, в принципе, частицами. Ведь не существует частиц, нечувствительных к гравитации.

Пусть такие превращения маловероятны, т. е. случаются чрезвычайно редко,— в космических масштабах они могут оказаться принципиальными.

Пока, впрочем, не известно, имеют ли вообще место эти явления в действительности.

Конечная, но безграничная Вселенная

Выше в связи с обсуждением гравитационных трансмутаций частиц мы упомянули о космологии. И здесь нельзя не отметить, что эйнштейновская теория оказалась необычайно стимулирующей для развития именно космологических представлений. Толчок, который она дала, вызвал к жизни совершенно небывалые дотоле идеи и буквально обновил древнейшую из наук о природе — космологию.

Вселенная... Что мы знаем о ней? Ведь наши приборы позволяют нам заглянуть только в «уголок» Вселенной. Неисчислимые мириады звезд находятся так далеко от Земли, что наши оптические и радиотелескопы не могут «дотянуться» до них. Но мысль зовет исследователей все дальше. А что находится там, за чертой исследованного? Основанные «на общих соображениях» догадки, что «там» все идет до бесконечности по принципу «и так далее», действовали, в общем, успокоительно и не слишком подталкивали фантазию. Но вот в 1917 году будто шквал пронесся в научном мире. Эйнштейн выступил с теорией конечной Вселенной. «Конечная Вселенная! Значит, существует какая-то граница Вселенной? А что там, по ту сторону границы? Что же, там «кончается пространство»? Разве мыслимо, чтобы...?»

Впрочем, прервем поток вопросов, многие из которых действительно обрушились на физиков. Попробуем разобраться, в чем, собственно, состоит утверждение о конечности пространства. И здесь нам опять поможет наша модель — пленка с ее «двумерными обитателями», которую мы ввели в свое время для пояснения кривизны пространства. Мы



молчаливо предполагали раньше, что эта пленка простирается вширь неограниченно далеко и лишь местами изгибается там, где находится «материя», т. е. создающие гравитацию тела. «Мир» в нашей модели был бесконечным. Ну, а если эта «материя» распределена более или менее равномерно? Тогда кривизна — тоже примерно одинаковая — должна быть везде. Как же представить себе такую пленку, которая везде искривлена одинаково? Нет ничего легче, достаточно вспомнить обычный детский воздушный шарик!

И вот попытаемся опять «войти в положение» тех двумерных исследователей, которыми наша фантазия населила пленку. Для них поверхность шара — это все пространство. Действительно, если бы они снарядили экспедицию, дав ей строгий наказ двигаться все время в одну и ту же сторону — «по прямой» (мы взяли последние слова в кавычки, чтобы напомнить — сама «прямая» искривляется!), то эта экспедиция рано или поздно, к изумлению организаторов и участников, вернулась бы к исходной точке, только с другой стороны. Все новые и новые экспедиции могли бы отправляться в путь. И в какую бы сторону они ни направлялись, все они должны были бы, совершив замкнутый круг, возвращаться к месту отправления. Какой же вывод должны были бы сделать двумерные мужи науки? Единственный: «Наша Вселенная,— сказали бы они,— не простирается до бесконечности, а имеет конечные размеры. Но в то же время она безгранична — ни одна из экспедиций не обнаружила ничего похожего на границу Вселенной». Безграничная, но не бесконечная! Именно такими словами определил Эйнштейн в своей теории наше пространство. Смысл этих слов в общем тот

же, что и в модели: если представить себе летящий все прямо и прямо космический корабль, то он должен в конце концов вернуться к месту старта (если, разумеется, ему не помешает столкновение с небесными телами). Но можно говорить и не о космическом корабле — то же произойдет и с самым быстрым из путешественников — со световым лучом. Двигаясь в искривленном тяготением пространстве, он «замкнется на себя», пролетев сквозь неоглядные дали безграничного, но все же конечного пространства.

Расширяющаяся Вселенная

Однако это еще не все: теория гравитации Эйнштейна не только дает возможность говорить о конечности Вселенной, но приводит к еще более поразительному выводу — выводу о расширении Вселенной.

Впервые этот вывод, к которому сам Эйнштейн вначале отнесся скептически, был сделан советским физиком А. Фридманом.

В основе теории Фридмана лежит следующее основное предположение: Вселенная в целом однородна и изотропна. Это означает, что ни один из больших участков Вселенной не отличается по своим свойствам от остальных. Все направления во Вселенной совершенно равноправны. Средняя плотность вещества всюду одинакова.

При этом предположении уравнения тяготения Эйнштейна, совершенно однозначно приводят к выводу о том, что Вселенная не может быть стационарной. Она расширяется, так что все звездные скопления — галактики — разбегаются друг от друга.

Вспомним нашу двумерную модель конечной Вселенной — детский шарик. Этот шарик — Вселенная — непрерывно раздувается, так что расстояния между любыми его точками возрастают. Причем возрастают тем быстрее, чем дальше эти точки расположены друг от друга: ведь увеличивается каждый сантиметр отрезка кривой, соединяющей точки. Двумерные астрономы наверняка смогли бы это обнаружить.

Если смотреть на удаляющуюся звезду, то ее спектр будет смещаться в сторону длинных волн. Все линии делаются «более красными». (Это явление

называется красным смещением, а вызвано оно эффектом Доплера; смещение тем заметнее, чем больше скорость.)

Самое замечательное в том, что наши земные астрономы сумели обнаружить такое явление. Американский астроном Хаббл установил, что все звездные острова Вселенной — галактики — удаляются от нашей. Причем, чем дальше от нас галактика, тем больше смещаются спектральные линии ее световых волн, тем больше, следовательно, относительная скорость движения галактик. Эта скорость u удовлетворяет простому закону: $u = Hr$, где r — расстояние до галактики, а H — постоянная Хаббла.

В 1963 г. были открыты наиболее удаленные от нас квазизвездные объекты — квазары. Главной отличительной особенностью квазаров является их колоссальная светимость, в сотни раз превышающая светимость ярчайших галактик. Отдельные квазары удаляются от нашей Галактики с фантастическими скоростями порядка 240 000 *км/сек*, т. е. около четырех пятых скорости света. При этом ультрафиолетовое излучение квазаров воспринимается как видимый свет.

Закон Хаббла непосредственно вытекает из теории Фридмана. Причем H убывает обратно пропорционально времени и, следовательно, скорость расширения Вселенной должна уменьшаться.

Поразительное теоретическое предсказание сомкнулось с замечательным экспериментальным открытием. Не удивительно, что научный мир — да и не только он — был буквально потрясен новизной и смелостью космологических идей Эйнштейна — Фридмана. Слово «переворот» безо всяких скидок подходит к тому, что здесь произошло.

Прошедшее и будущее Вселенной

То, что Вселенная расширяется (или, точнее, тот участок Вселенной, в котором мы живем,) — совершенно бесспорно. Это непосредственный экспериментальный факт. К этому же приводит теория. Но что будет с Вселенной в дальнейшем? Какова она была в прошлом? Наконец, конечна или бесконечна Вселенная в действительности?

Определенных ответов на эти вопросы нет, но многое можно сказать уже сейчас, если допустить справедливость предположения об однородности и изотропности Вселенной.

Поговорим сначала о будущем Вселенной. Как ни странно, именно здесь есть бо́льшая определенность. Имеется лишь две возможности, и речь идет о выборе между ними.

Согласно теории все зависит от соотношения между средней плотностью ρ Вселенной в данный момент времени и некоторой критической плотностью $\rho_к = \frac{3}{8\pi}\frac{H^2}{\varkappa}$, где H — постоянная Хаббла в данный момент времени, а $\varkappa$ — гравитационная постоянная *).

Если ρ меньше $\rho_к$, то расширение Вселенной никогда не прекратится. Скорость разбегания галактик постепенно будет уменьшаться, но никогда расширение не сменится сжатием. Галактики разойдутся на невообразимые расстояния, и наш звездный остров окажется совершенно затерянным в безбрежном океане пространства.

Но если ρ больше $\rho_к$, то с течением времени расширение Вселенной сменится сжатием и место красного смещения займет фиолетовое. Когда это произойдет, если это вообще произойдет, предсказать пока нельзя.

Итак, чтобы знать будущее Вселенной, надо знать среднюю плотность материи внутри нее. Плотность $\rho_к = 2 \cdot 10^{-29}$ *г/см*^{3} известна, так как постоянная Хаббла и гравитационная постоянная могут быть измерены достаточно точно.

Главная трудность в определении ρ. Надо знать массу материи (как вещества, так и излучения) не только в звездах, но и во всем межзвездном пространстве видимой части Вселенной. Оценки, которыми мы сейчас располагаем, весьма противоречивы. По одним данным ρ меньше $\rho_к$, а по другим больше. Окончательные выводы не получены.

Определение плотности материи играет важнейшую роль еще в одном отношении. Соотношение ρ

*) Фактически соотношение между ρ и $\rho_к$ определяется отношением потенциальной и кинетической энергий Вселенной.

и $\rho_к$, от которого зависит будущее Вселенной, является определяющим для пространственной структуры Вселенной как целого. При ρ, большем $\rho_к$, средняя кривизна мира положительна и Вселенная конечна. При ρ, меньшем $\rho_к$, Вселенная бесконечна. Значит, теория гравитации Эйнштейна показывает лишь, что наша старая уверенность в бесконечности Вселенной может и не соответствовать истине, но не утверждает безоговорочно, что мир замкнут в себе самом.

Посмотрим теперь, что можно сказать о прошлом мира. Когда-то Вселенная должна была быть сжата в очень малом объеме. Плотность материи в этот момент была бесконечно велика. Если принять этот момент за начало отсчета времени ($t=0$), то, зная постоянную Хаббла, можно оценить время расширения Вселенной. Оно оказывается сравнительно невелико: всего лишь 16 или 17 миллиардов лет. Не много по астрономическим масштабам.

В каком состоянии находилось вещество Вселенной в этот момент? Как из такого сверхплотного вещества возникла наша Вселенная с ее звездами и звездными скоплениями? И, наконец, что же было со Вселенной до этого?

На все эти вопросы никто сейчас не в состоянии дать определенного ответа. Однако и здесь уже намечаются возможные решения.

При сверхплотном состоянии вещества в начальном состоянии Вселенной, очевидно, не одна только гравитация должна быть существенной. Заметную роль должны были играть и другие силы. Поэтому лишь после знакомства с ними мы можем сказать несколько слов о существующих здесь гипотезах.

Рождение галактик

Остановимся сейчас на проблеме образования галактик. Вряд ли можно сомневаться в том, что в сверхплотном состоянии Вселенной ее плотность и температура были одинаковы во всех участках пространства. Что же привело к весьма неоднородному распределению материи во Вселенной, к сгущению ее в галактики и звезды?

Сейчас насчитывается около 10^{14} звездных скоплений — галактик, каждая из которых состоит из

сотен миллиардов звезд. Размеры галактик огромны. Так, наша Галактика (галактика с большой буквы!) представляет собой образование, похожее на двояковыпуклую линзу диаметром около 100 000 световых лет и толщиной около 1000 световых лет (световой год — это расстояние, проходимое светом за один год,— 10^{13} *км*). Расстояния между галактиками значительно превышают их размеры. На небе галактики распределены неравномерно. Как правило, они образуют скопления размером до 10 миллионов световых лет.

Большинство ученых полагает, что образование галактик — следствие гравитационной конденсации, о которой мы уже говорили при обсуждении теории образования планет. Но образование галактик началось задолго до образования планет при совсем другой температуре и происходило не из газово-пылевых облаков, а из водорода.

На ранних стадиях эволюции Вселенной, когда ее температура была выше 3000 °К, вся материя состояла в основном из электронов, протонов и фотонов. При столь больших температурах нейтральные атомы не могли образоваться, так как кинетическая энергия относительного движения электронов и протонов была больше энергии связи этих частиц.

Гравитационная конденсация звезд, начавшаяся после образования водорода — следствие гравитационной неустойчивости. Незначительные уплотнения газа, вызванные случайными причинами, начинают в дальнейшем расти, притягивая к себе окружающее вещество. В результате плотность вещества растет, несмотря на то, что расширение Вселенной в целом приводит к уменьшению средней плотности. На определенном этапе последующее увеличение плотности отдельных участков облаков газа, возникших вследствие гравитационной неустойчивости, происходит благодаря столкновению атомов друг с другом. При хаотическом движении атомов всегда может случиться так, что один из атомов, движущийся быстрее, настигает медленно движущийся атом и сталкивается с ним. В результате возникает микроуплотнение, на которое со все бóльшими и бóльшими скоростями налетают другие атомы.

Получается, по выражению Я. Б. Зельдовича, нечто похожее на «кучу малу», которая случается на автострадах при авариях. Области повышенной плотности постепенно увеличиваются, и в конце концов, как показывают расчеты, образуется плоский слой вещества, похожий на блин. Такая конфигурация связана с выделением определенного направления, задаваемого направлением движения частиц, столкнувшихся в первую очередь.

Позднее эти слои вещества распадаются на отдельные части меньшей массы — протогалактики, которые в свою очередь распадаются на звезды. Наибольшая трудность состоит в выяснении причин вращения галактик. Но уже сейчас есть основания полагать, что это вращение не было присуще материи Вселенной изначально, а возникло в процессе гравитационной конденсации.

В дальнейшем при эволюции звезд начали играть, несомненно, большую роль ядерные и другие силы наряду с гравитационными. Пока мы это тоже не будем обсуждать.

А что было со Вселенной до начала расширения?

Проще, в принципе, дать ответ для конечной Вселенной. Ведь тогда расширение может вообще говоря смениться сжатием, и состояние Вселенной в момент $t=0$ нужно рассматривать как результат предшествующего сжатия. Тогда мы придем к гипотезе пульсирующей Вселенной. Вселенная пульсирует (расширяется и сжимается) извечно с периодом, который пока знать нам не дано. Это самая простая и наиболее доступная нашему разуму картина эволюции Вселенной, существующей вечно. Но, конечно, не критерий простоты должен быть в таких вопросах решающим.

Здесь, как и всегда в физике, решающий голос принадлежит эксперименту. Да, мы не оговорились, именно эксперименту, хотя может показаться, что его можно осуществить, разве что обзаведясь машиной времени, которая позволила бы заглянуть в далекое прошлое.

Очень интересные исследования, проведенные, в частности, академиком Я. Б. Зельдовичем и его учениками, показывают, что последствия тех процес-

сов, которые бурно протекали на самых ранних стадиях развития Вселенной, должны проявляться и теперь. Мы вернемся к этому вопросу в дальнейшем.

Великий шаг на пути познания природы

Может возникнуть желание спросить: если теория гравитации Эйнштейна так сложна, если космологические выводы из нее имеют в значительной степени предварительный, а зачастую и фантастический характер, если, наконец, эта теория ничем не обогатила пока технику, то что же тогда заставляет самых выдающихся современных ученых говорить о ней, как о «самом замечательном достижении человеческого ума»? Что привлекает к ней неослабное внимание физиков, философов, астрономов, да и огромного числа мыслящих людей вот уже более шестидесяти лет? Разумеется, не только «хороший вкус человечества». И не только могучая красота основных принципов этой теории.

Главное — это открытие необычайно сложных новых физических связей, о которых прежде исследователи природы даже не подозревали.

С помощью теории Эйнштейна мы вступили в новую область, представляющую для человека ни с чем не сравнимый интерес. Здесь впервые в точной физической теории мы приблизились к познанию бесконечного. Человек впервые начал ощущать дыхание Вселенной не с помощью поэтических откровений, а на путях точного знания. Без теории Эйнштейна большинство тех вопросов, о которых шла речь, не могли быть даже поставлены.

Примерно сто лет назад, обнаружив связь между световыми и магнитными явлениями, Фарадей в восторге писал, что ему «удалось намагнитить свет и осветить магнитную силовую линию».

Теория Эйнштейна, можно смело сказать, пролила новый свет на научное миропонимание, «магнетизм» ее идей властвовал и продолжает властвовать над естествоиспытателями.

И как бы ни пошло дальнейшее развитие нашего понимания гравитации, гениальное творение «Ньютона двадцатого века» всегда будет покорять своей неповторимой дерзновенностью, всегда останется великим шагом на пути познания природы.

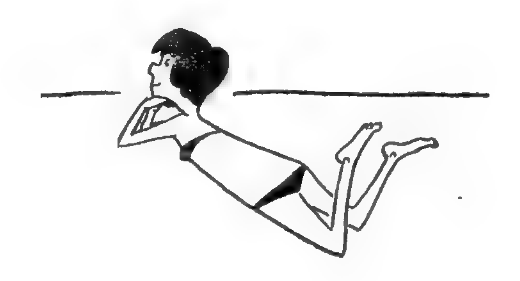
Глава третья

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИЛЫ

О теле электрическом я пою.

Уолт Уитмен, «Листья травы»





1. *Какие силы называются электромагнитными?*

2. *Что такое электрический заряд?*

3. *Взаимодействие неподвижных электрических зарядов.*

4. *Взаимодействие движущихся электрических зарядов.*

5. *Близкодействие или действие на расстоянии?*

6. *Что такое электрическое и магнитное поле?*

7. *Взаимная связь электрических и магнитных полей.*

8. *Электромагнитные волны.*

I.

Дети и ученые

Лежащая на столе книга, конечно, не провалится сквозь стол, несмотря на притяжение к Земле. Всем известно, что книга не соскользнет, если даже стол немного наклонить. Никого обычно не удивляет способность ног резко увеличивать нашу скорость, если из-под ворот выскакивает злая собака. Наконец, мало кто размышляет о причинах, по которым книга, стол, камень и другие твердые тела сохраняют свою форму.

Подобные факты мы встречаем на каждом шагу и привыкли к ним с детства. Они становятся настолько очевидными, что мы совершенно не ощущаем потребности в их объяснении. В большинстве случаев, чтобы уверенно ориентироваться в окружающем нас мире, это и не нужно. Всегда важно знать, что произойдет, но не всегда важно знать — почему это происходит так, а не иначе.



Очевидно, только в раннем детстве нас могут волновать вопросы о том, почему происходят вокруг нас самые обыденные явления. Но решение этих вопросов совершенно непосильно для ребенка, а взрослый человек очень редко возвращается к тем задачам, от решения которых отказался в детстве. Стремление к объяснению поведения «простых» вещей оказывается, по словам английского физика Перри, запрятанным далеко в глубине сознания, и ум привлекают явления неожиданные, непривычные. Только детям и ученым свойственна любознательность по отношению к самым привычным явлениям.

Вот почему во многих отношениях легче рассказать, например, о необычайных свойствах пространства и времени, вскрытых в теории относительности, чем объяснить, почему камень сохраняет свою форму. В первом случае мы немедленно ощущаем интерес к предмету, а второй факт настолько привычен, что объяснение его сразу рискует вызвать скуку.

В действительности же ответить на вопрос о причинах примелькавшихся явлений, перечисленных в начале этой главы, далеко не просто. Попытки разобраться в них очень быстро заведут нас весьма далеко. Собственно говоря, настолько далеко, насколько в настоящее время продвинулась наука. Не забираясь пока в такие глубины, проследим только на одном примере хотя бы начало цепочки вопросов, которые неизбежно возникнут у каждого, кто попытается вдуматься в объяснение обыденных фактов. Фактов, которые даже неудобно называть таким научным термином, как физические явления.

Сила упругости и ее «родственники»

Перед вами сейчас лежит на столе книга. На нее действует сила тяжести. Тем не менее она не падает вниз. Почему? Человек, не искушенный в науках, ответит: «Ей не дает падать стол». Но это ведь не объяснение, а просто указание на факт.

Тот, кто приобщился к школьной физике, пойдет дальше. На книгу, скажет он, действует сила со стороны стола, которая и уравновешивает силу тяжести. Эту силу называют силой упругости, и она возникает из-за небольшого, незаметного на глаз про-

гиба стола, вызванного книгой. Но ответить на вопрос, почему при прогибе стола возникает сила упругости, школьник уже вряд ли сможет.

Мы с вами также на этом месте прервем цепочку вопросов и ответов и вернемся к выяснению причины появления сил упругости только много страниц спустя. Для этого имеются весьма серьезные основания. Дело в том, что силы упругости имеют общее происхождение со многими другими силами, имеют многочисленную родню, и совсем не напоминают в этом отношении силы всемирного тяготения, у которых наука не отыскала на сегодняшний день даже самых отдаленных родственников.

Силы упругости, которые позволяют твердым телам сохранять свою форму, препятствуют изменению объема жидкостей и сжатию газов; силы трения, тормозящие движение твердых тел, жидкостей и газов; и, наконец, силы наших мышц — все это члены одной обширной семьи. Все они имеют общую природу, общее происхождение: *это электромагнитные силы*. Электромагнитным силам природа предоставила самую широкую арену деятельности. В повседневной жизни, за исключением притяжения к Земле и приливов, мы встречаемся только с различными видами электромагнитных взаимодействий, только с ними, если не считать ядерных, которые мы сравнительно недавно научились использовать. В частности, упругая сила пара также имеет электромагнитную природу.

Поэтому фактически смена «века пара» «веком электричества» означала лишь смену эпохи, когда мы не умели управлять электромагнитными силами, эпохой, когда мы научились распоряжаться ими по своему усмотрению.

Электромагнитные силы позволяют вам видеть книгу, которую вы читаете, ибо свет — это одна из форм электромагнитных взаимодействий. Сама жизнь была бы немыслима без этих сил. Живое существо, и даже человек, как показали полеты космонавтов, способны длительное время существовать в состоянии невесомости. Но если бы на мгновение действие электромагнитных сил прекратилось, то сразу исчезла бы и жизнь.

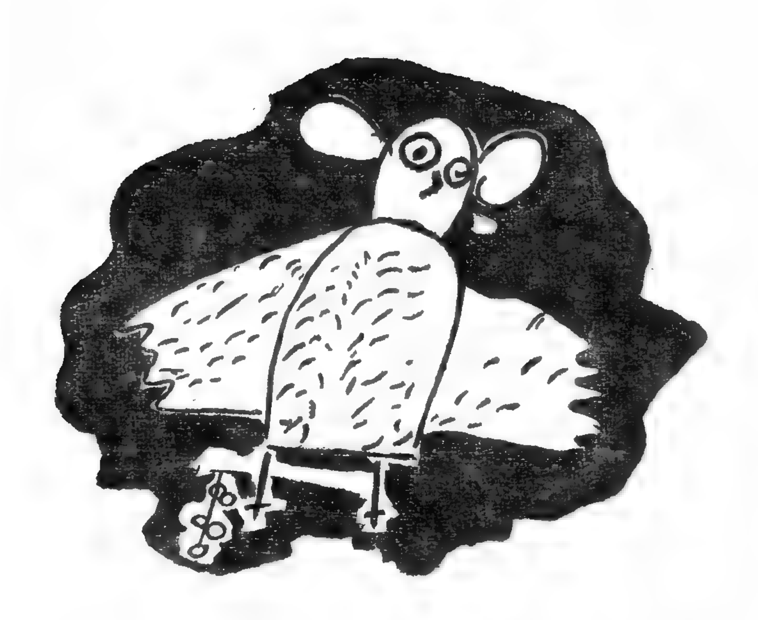
При взаимодействии частиц в самых компактных системах природы — в атомных ядрах — и при взаимодействии космических тел электромагнитные силы играют выдающуюся роль, в то время как ядерные и гравитационные силы существенны только либо в очень малых, либо в космических масштабах. Строение атомной оболочки, сцепление атомов в молекулы и образование кусков вещества определяются только электромагнитными силами. Трудно, почти невозможно указать явление, которое не было бы связано с действием электромагнитных сил. Соответственно трудно даже перечислить все многообразие их проявлений. Пока мы перечислили далеко не все.

С чего начать!

Легко после сказанного представить себе, что вряд ли целесообразно начинать знакомство с такой обширной семьей с внимательного рассмотрения одного из ее членов — сил упругости. Но с чего же тогда начать? Мы назвали множество разнообразных сил электромагнитными. Что это значит? Ведь назвать — это еще не значит что-либо объяснить *). Тем более, что обычно электрическими и магнитными силами называют совсем другое. Силой электрического притяжения или отталкивания называют силу взаимодействия между наэлектризованными телами. Например, силу, заставляющую мелкие кусочки бумаги притягиваться к расческе, которой мы несколько раз провели по волосам. Под магнитной силой обычно понимают силу, действующую со стороны магнита на проводник с электрическим током, или силы взаимодействия магнитов.

Пока мы только высказали утверждение, что большое количество разнообразных по форме взаимодействий имеет общую природу. В первую очередь, очевидно, нужно ответить на следующий вопрос: в чем же состоит общность перечисленных взаимодействий? Или, говоря иными словами: какие силы называются электромагнитными?

*) Правда, к сожалению, у многих людей так велика привычка видеть объяснение в одном слове, если это слово достаточно авторитетно, что достаточно сказать: «здесь действует электричество», как они сразу удовлетворены, хотя к настоящему объяснению только после этого и нужно приступать.



Мы в дальнейшем не будем бояться некоторых повторений, памятуя мудрое замечание глубокомысленной Совы из чудесной книжки «Винни Пух и все остальные» о том, что существуют вещи, которые «вы спокойно можете объяснить два раза, не рискуя, что кто-нибудь поймет, о чем вы говорите». Там это замечание относилось к объяснению того, что такое «Необходимая или Соответствующая Спинная Мускулатура», у нас речь пойдет о не менее сложных вещах.

Если постараться возможно короче ответить на наш основной вопрос, то можно сказать так: *в основе действия всех перечисленных сил лежат одни и те же общие законы — законы взаимодействия электрически заряженных тел.* Все перечисленные силы обусловлены в конечном счете взаимодействием между элементарными частицами, несущими электрические заряды. Взаимодействие же между заряженными частицами осуществляется посредством электромагнитного поля. Поэтому данные силы и называются электромагнитными. Если бы по мановению волшебной палочки все электрические заряды исчезли, то сразу прекратили бы свое существование силы

упругости, трения и т. д. Распались бы на составные части не только тела, но и слагающие их атомы.

Наша ближайшая цель будет состоять в знакомстве с основными законами электромагнитных взаимодействий. Только после этого мы сможем разобраться во всем богатстве проявлений электромагнитных сил и понять, почему эти силы столь широко распространены в природе и столь разнообразны.

2.

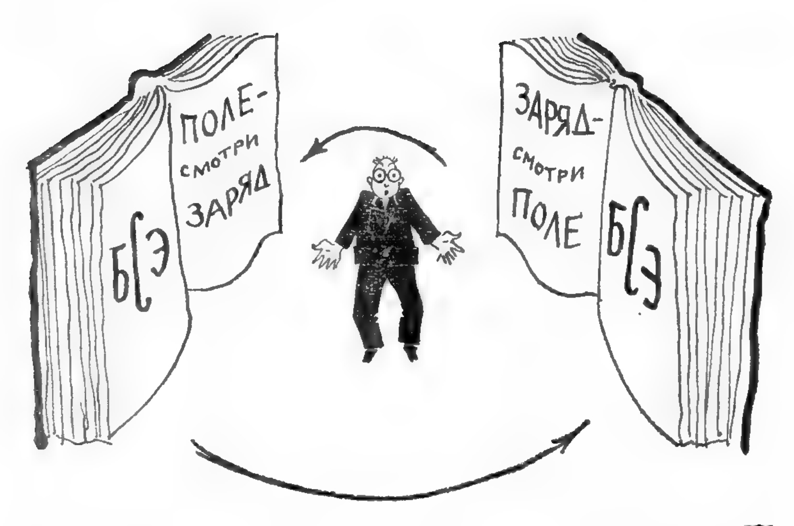
Трудности определений

Что такое электрический заряд? Откроем Большую Советскую Энциклопедию и прочтем: «Электрический заряд — свойство некоторых частиц (электронов, протонов, позитронов, некоторых видов мезонов), состоящее в том, что они всегда связаны с электрическим (электромагнитным) полем и испытывают определенные воздействия внешних электромагнитных полей». Но что же такое электромагнитное поле? Откроем Энциклопедию на соответствующем месте. Сказано следующее: «Электромагнитное поле — физическое поле движущихся электрических зарядов, осуществляющее взаимодействие между ними». Возникает известная ситуация — змея кусает себя за хвост. Заряд это то, что связано с электромагнитным полем, а поле — то, что связано с зарядом.

Здесь не недосмотр редакции. Бросающаяся в глаза недостаточность этих определений отражает ту действительно существующую трудность, с которой сталкивается каждый, пытающийся дать краткое определение этих фундаментальных понятий. Дело в том, что кратких, удовлетворительных во всех отношениях определений вообще дать здесь невозможно. Самое важное — уяснить себе именно это. Мы привыкли находить понятные нам объяснения для весьма сложных образований и процессов вроде атома, термодиффузии, цепной ядерной реакции

и т. д. В действительности же именно такие сложные образования, как, например, атом, не так уж трудно пояснить. А вот самые основные, элементарные понятия, не расчленимые уже далее на более простые, лишенные по данным науки на сегодняшний день какого-либо внутреннего механизма, кратко удовлетворительным образом уже не пояснить. Особенно, если объекты непосредственно не воспринимаются нашими органами чувств. Именно к таким фундаментальным понятиям относятся электрический заряд и электромагнитное поле. При знакомстве с ними в школе часто происходит следующее: сначала их просто не понимают, потом привыкают к самим понятиям и используют их, не отдавая себе отчета во всей глубине содержания.

Положение здесь настолько сложно, что еще сравнительно недавно, в середине прошлого столетия, даже выдающиеся умы своего времени были способны придерживаться удивительнейших представлений о сущности электричества. Так, Гегель считал, что электричество — это «собственный гнев, собственное бушевание тела», его «гневная самость», которая «проявляется в каждом теле, когда его раздражают» («Философия природы»).



Электрический заряд и элементарные частицы

Мы попытаемся вначале выяснить, не *что такое электрический заряд*, а что скрывается за утверждением: *данное тело или частица имеют электрический заряд*. Это почти одно и то же, но не совсем и, пожалуй, второе проще для понимания.

В настоящее время ни для кого не является секретом, что все тела природы построены из мельчайших неделимых уже далее, насколько нам сейчас известно, частиц, которые принято по этой причине называть элементарными. Нам нет нужды перечислять все открытые на сегодня частицы. Важно, что основную роль строительных кирпичей мироздания играют электроны, протоны и нейтроны. Чем же отличаются эти частицы друг от друга?

Собственно говоря, утверждая, что частицы различны, мы только утверждаем, что они по-разному воздействуют на окружающий мир и по-разному ведут себя под его влиянием. Так, например, все частицы имеют массу, причем масса их различна. У протона она в 1836 раз больше, чем у электрона, а у нейтрона несколько больше, чем у протона, и т. д. Соответственно, с одной стороны, эти частицы по разному ведут себя под влиянием внешних сил, ибо инертные свойства их различны, а, с другой стороны, силы гравитационного взаимодействия их друг с другом и с внешним миром различны при прочих равных условиях.

Когда мы говорим, что электроны и протоны электрически заряжены, то это означает, что они способны к взаимодействиям определенного типа (электромагнитным) и ничего более. Отсутствие заряда у частицы означает, что подобных взаимодействий она не обнаруживает. *Сам заряд — это количественная мера способности тела к электромагнитным взаимодействиям*, подобно тому как гравитационная масса — величина, определяющая интенсивность гравитационных взаимодействий. Электрический заряд — вторая (после массы) важнейшая характеристика элементарных частиц, определяющая их поведение в окружающем мире.

Во всем сказанном нет ничего необычного. В сущности ведь и люди, если не говорить об их внеш-

ности, отличаются друг от друга главным образом по тому, как они воздействуют на окружающий мир и какое влияние способно оказать на них окружение.

Так, например, когда мы говорим, что мистер Пиквик был добрым человеком, способным даже вызволить из долговой тюрьмы вдову, которая пыталась его на себе женить, то тем самым мы подразумеваем определенную закономерность его поведения в окружении людей. Если поведение человека обнаруживает обратную закономерность, то он будет злодеем, как мистер Каркер из «Домби и сына», у которого даже каждый зуб казался миссис Домби орудием зла.

Наконец, человек может спокойно зрить

«...на правых и виновных,
Добру и злу внимая равнодушно,
Не ведая ни жалости, ни гнева».

Таков, например, Пимен в «Борисе Годунове».

В природе имеются частицы с зарядами противоположных знаков. Заряд протона называется положительным, а электрона — отрицательным. Положительный знак заряда у частицы не означает, конечно, наличия у нее особых достоинств. Введение зарядов двух знаков просто выражает тот факт, что заряженные частицы могут как притягиваться, так и отталкиваться друг от друга. При одинаковых знаках заряда частицы отталкиваются, а при разных — притягиваются.

Подобно тому как люди различаются не только добротой и весом, элементарные частицы имеют кроме заряда и массы ряд других свойств. Но вот что важно: как бы ни отличались свойства элементарных частиц в других отношениях, заряд, если он вообще есть, одинаков у всех: у электронов, протонов, позитронов, антипротонов, легких, тяжелых и сверхтяжелых мезонов. Различными могут быть только знаки. Заряд, меньший заряда электрона, в природе не существует. Доброта же, как и прочие нравственные качества, распределена между людьми весьма и весьма неравномерно. Между ангельским и дьявольским — этими крайними воплощениями

человеческой личности — лежит целая бездна разнообразных характеров.

Как показывает опыт, электрический заряд в природе сохраняется. Сумма зарядов всех частиц (с учетом знака зарядов) остается неизмененной. Если возникает новая заряженная частица (а это случается очень часто), то одновременно мы обязательно наблюдаем рождение частицы, имеющей заряд противоположного знака. Гибнут пары противоположно заряженных частиц также только одновременно.

Заряд и законы электромагнитных взаимодействий

Наличие электрического заряда у частиц предполагает *строго определенные законы* силовых взаимодействий между ними. Законы, которые допускают точную математическую формулировку, и определяют движение самих частиц. Вполне очевидно, что мы в сущности ничего не знаем еще о заряде, если не знаем законов этих взаимодействий. Знание законов по существу органически должно входить в наши представления о заряде. (Ведь нам ничего не говорила бы характеристика человека — добрый, если бы мы не знали, что такое добрые дела.) Законы эти отнюдь не просты и изложить их в двух словах невозможно. Написаны сотни томов, посвященных электромагнитным взаимодействиям, и еще сотни будут написаны. Конечно, для понимания того, что такое электрический заряд, не обязательно прочитать все эти тома, но более или менее основательное знакомство с электродинамикой (так называют науку об электромагнитных взаимодействиях) необходимо.



Если после всего сказанного вы прочувствовали причину, по которой нельзя столь же просто рассказать, что такое электрический заряд, как, например, рассказать, что такое паровоз, можно спокойно продолжать наш рассказ дальше. Если же нет, то не поможет ли вам еще одно соображение?



Вы, наверное, помните прекрасную сказку Льюиса Кэролла «Алиса в стране чудес». У Алисы был друг — Чеширский кот. В затруднительных случаях он являлся к ней, причем не весь сразу. Сначала появлялась улыбка и лишь затем обрисовывалось все остальное. Исчезал он в обратной последовательности, начиная с кончика хвоста и кончая улыбкой, которая оставалась еще некоторое время после того, как все остальное скрылось. «Часто приходилось видеть кота без улыбки,— удивлялась Алиса,— но — улыбка без кота!»

Совершенно аналогично часто можно встретить частицу без заряда, но заряд без частицы — это та же улыбка без кота, и поэтому может появиться только в сказке. Электрический заряд по современным представлениям нельзя рассматривать как некий дополнительный механизм, который несут на себе частицы. Механизм, который можно снять с частицы, разложить на составные части и снова собрать. Наличие у частицы заряда неразрывно связано со всей ее не известной нам пока еще структурой, точно так же как, например, доброта связана со всем психическим обликом человека. Как нет отдельного механизма, ответственного за добрые дела, так нет механизма, ответственного за «электромагнитные дела» в частице.

Зарядом мы называем в сущности не механизм в частице, а способность ее в целом взаимодействовать с другими частицами определенным образом *).

Речь идет у нас сейчас о том, каковы представления в науке сегодня. Не следует думать, что наши сведения о заряде являются исчерпывающими и в дальнейшем наука уже ничего к ним не в состоянии добавить. Уже сейчас в физике элементарных частиц ставятся вопросы: почему заряжены только некоторые элементарные частицы? Почему не существует заряда большего или меньшего, чем у электрона? Как величина заряда связана с другими мировыми

*) Следует заметить, однако, что электрический заряд действует одинаковым образом у всех частиц. Другие свойства частиц не оказывают влияния на ее электромагнитное поведение.

постоянными, такими как скорость света, постоянная Планка и т. д.? Кто знает, быть может недалеко то время, когда ответы будут найдены: определенные успехи в исследовании самого сокровенного уже налицо. В опытах Хофштадтера при бомбардировке протонов электронами очень большой энергии удалось установить примерный характер распределения электрического заряда внутри этих частиц. Оказалось, что заряд протона «размазан» по конечной области пространства (радиусом около $0{,}8 \cdot 10^{-13}$ сантиметра) и распределен в этой области отнюдь не равномерно. В центре имеется уплотненная часть — так называемый «керн» примерно в 4 раза меньших размеров, чем сам протон. Одновременно выяснилось, что заряженные области имеются и внутри нейтрона.

Самое поразительное в том, что, несмотря на размазанность заряда в пространстве, от него нельзя отщипнуть ни единой крупицы. Невозможность существования заряда, меньшего определенного количества, — самый, пожалуй, непонятный факт во всем, что касается природы и сущности электрического заряда.

Заметим еще, что пока мы говорили только о зарядах элементарных частиц. Тело больших размеров (макроскопическое), как нетрудно представить себе, будет электрически заряжено, если оно содержит избыточное количество элементарных частиц одного знака. Отрицательный заряд тела обусловлен избытком электронов по сравнению с протонами, а положительный — их недостатком. Большинство тел электрически нейтрально, так как число электронов в них равно числу протонов. Нейтрален ли в целом мир? Если Вселенная конечна, то ее электрический заряд равен нулю. В случае бесконечной Вселенной полный заряд может быть отличен от нуля.

Существенно, что электрическая нейтральность совсем не означает отсутствия у тела электромагнитных свойств. В скрытой форме они всегда имеются. Даже нейтральная элементарная частица нейтрон их не лишена.

По своим электромагнитным свойствам нейтрон подобен маленькому магниту.

3.

Первые шаги

Мы никогда не узнаем, кто первым обратил внимание на удивительную способность янтаря, потертого о шерсть, притягивать к себе различные легкие предметы, не соприкасаясь с ними. Произошло это очень давно. По словам древнегреческого философа Фалеса Милетского, жившего в VI веке до нашей эры, это были ткачи.

Позднее было обнаружено, что таким свойством обладает не только янтарь, но и стекло, эбонит и другие вещества, потертые о мех или кожу. Янтарь по-гречески — электрон, и поэтому тела, приведенные в данное состояние, стали называть наэлектризованными.

Термин «электричество» имеет, таким образом, довольно поэтическое происхождение.

В этих простейших опытах люди впервые столкнулись с явным проявлением электрических сил. Но прошло более двух тысячелетий, прежде чем началось систематическое исследование электричества и был открыт закон взаимодействия наэлектризованных тел. Необычайное свойство янтаря и некоторых других предметов казалось странным курьезом: как могут притягиваться тела, не соприкасаясь? Ничто не говорило о том, что здесь в простейшей форме выступают законы, управляющие течением большинства процессов на Земле.

На протяжении многих веков никаких серьезных попыток научного объяснения опытов с наэлектризованными телами фактически не было предпринято. Нельзя же считать объяснением попытки приписать янтарю живую душу. Развлекались этими опытами зачастую просто состоятельные люди, не имевшие никакого отношения к науке. При дворах европейских государей устраивались «электрические сеансы». Особенно увлекалась ими Екатерина II. Были построены электрические машины. Научились получать большие электрические искры.

Тем не менее именно с этих простых опытов началось развитие науки об электричестве. И не только потому, что притяжение наэлектризованных тел поражало воображение и само по себе побуждало искать разгадку, в то время как, скажем, упругие силы столь привычны, что не способны вызвать никаких эмоций. Главное в том, что здесь непосредственно мы встречаемся с прямым проявлением одного из основных законов взаимодействия заряженных тел, установить который оказалось много легче, чем разобраться во взаимодействии атомов, слагающих электрически нейтральные тела.

Когда мы в начале этой главы попытались проследить цепочку вопросов и ответов относительно происхождения сил упругости и остановились в самом начале, то делать это было, конечно, не обязательно. Можно было бы идти дальше, рассказать об атомах, их строении и силах взаимодействия между ними. Просто такой способ изложения мало удобен. Но допустить, что, изучая природу сил упругости, люди могли бы прийти к открытию основных законов электромагнитных взаимодействий, совершенно невероятно. С тем же успехом можно допустить, что люди могли бы сначала изобрести автомобиль, а затем, постепенно упрощая его, им удалось бы создать телегу и, наконец, колесо. Хотя сейчас, объясняя ребенку, живущему в городе, что такое телега, проще всего, пожалуй, начать с автомобиля.

В настоящее время каждому ясно, что объяснить движение камня гораздо проще, чем движение кошки. Настолько правильны у современного человека, даже далекого от науки, представления о мире. Но, говоря по совести, очень многим и сейчас проявления сил упругости (например, подскакивание футбольного мяча) кажутся простыми и понятными, а вот притяжение на расстоянии клочков бумаги к расческе или двух магнитов друг к другу представляется загадкой. На самом же деле все обстоит как раз наоборот. Проще именно эти «загадочные» силы, а привычные силы упругости можно в действительности понять, если свести их к проявлению сил «необычных». В дальнейшем мы это и сделаем.



До середины XVIII века успехи в изучении электричества были невелики. Было обнаружено электричество двух родов — положительное и отрицательное, открыта возможность передачи и накопления электричества, правильно истолкована молния, как гигантская электрическая искра между двумя облаками или между облаком и Землей. И, наконец, дело дошло до первого практического применения приобретенных знаний: Франклином был изобретен молниеотвод (часто не вполне правильно называемый громоотводом). Оказалось, что заостренный металлический штырь, приподнятый над зданиями и заземленный, предохраняет эти здания от попадания молнии. Впечатление, созданное этим открытием, было огромно. Молниеотвод буквально вошел в моду. Дамы носили его на шляпках в качестве украшений *). Любопытно, что английский король Георг III настоял на том, чтобы молниеотводы во дворце имели круглые наконечники, а не острые, как это предложил республиканец Франклин, игравший выдающуюся роль в борьбе с Англией за независимость североамериканских колоний. Воспротивившийся самодурству короля президент Королевского общества вынужден был уйти в отставку.

Лишь после громадных успехов механики Ньютона оказалось возможным открытие точного закона взаимодействия неподвижных наэлектризованных

*) Интерес со стороны дамских мод к новейшим достижениям науки и техники не угас и сегодня. Запуск первого советского искусственного спутника Земли повлиял одно время на форму шляпок и причесок.

или, как теперь обычно говорят, электрически заряженных тел. Этот закон был первоначально открыт не для отдельных элементарных частиц, о существовании которых в то время ничего не было известно, а для больших заряженных тел. При электризации трением, как мы теперь хорошо знаем, наиболее подвижные заряженные частицы — электроны — переходят с одного тела на другое. В результате этого перехода тело, потерявшее электроны, заряжается положительно, а получившее их в избытке — отрицательно.

Задачи науки

Создание Ньютоном механики, открытие сил всемирного тяготения и объяснение с их помощью движения планет оказало столь сильное влияние на умы ученых, что и в других областях физики стремились найти законы по образцу ньютоновских. Тем самым было задано верное направление научной мысли. Вместо бесплодных попыток придумать какой-либо неосязаемый механизм, который обеспечил бы силы, действующие на расстоянии между заряженными телами, стали искать опытным путем количественную форму для данного типа взаимодействия. Трудно переоценить значение этого переворота в подходе к изучению природы. Это был, несомненно, один из величайших переворотов в естествознании, начатый еще, как об этом уже говорилось в главе о гравитационных силах, до Ньютона и далеко не оконченный с его смертью. Сущность этого переворота в том, что задачу науки перестали видеть в попытках сведения непривычных, «непонятных» явлений к привычным и «понятным» с точки зрения здравого смысла. Задачей науки стало отыскание математически выражаемых общих законов природы, которые охватывали бы громадную совокупность фактов. Стали требовать объяснения на основе этих законов привычных нам вещей, которые, казалось бы, не требуют объяснения. Этим был брошен прямой вызов «здравому смыслу». Вызов, который в таких теориях, как теория относительности и квантовая механика, привел к прямому противоречию с подобным «здравым смыслом». Суть этой направленности науки далеко не вошла, к сожалению, в плоть и кровь всех людей. В связи с этим очень часто и сейчас возникает масса недоуменных

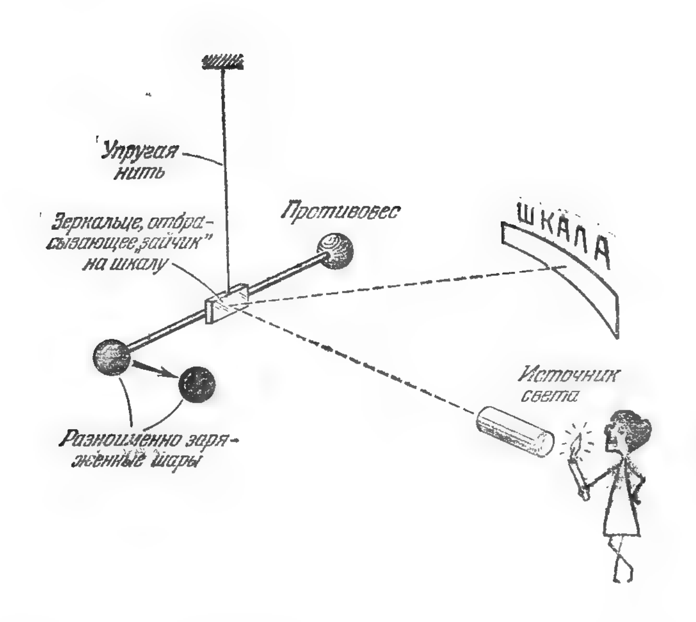
вопросов. Прочувствовать все это не легко. Переворот, который должен здесь произойти в сознании человека, можно сравнить с переворотом в голове дикаря, который от лечения такими понятными средствами, как изгнание злых духов и т. д., должен перейти к таинственным мерам: соблюдению гигиенических правил, кипячению воды, прививкам, антибиотикам и т. д. Изгонять нужно, как выясняется, не привычных «здравому смыслу» человекоподобных существ, а микробы и вирусы, которые даже в микроскоп не всегда видны.

Закон Кулона

Открытие взаимодействия неподвижных друг относительно друга электрических зарядов было сделано под прямым влиянием идей Ньютона и, в частности, его закона всемирного тяготения. Можно сказать, что это открытие было осуществлено без особых затруднений. В середине XVIII века уже высказывались предположения, что закон взаимодействия зарядов аналогичен закону всемирного тяготения. Первым доказал это экспериментально англичанин Кевендиш. Но этот выдающийся ученый отличался также выдающимися странностями. Преданность его науке была просто фанатической. Так, для сбережения времени он объяснялся с домашними раз и навсегда установленными знаками. Своих работ по электричеству Кевендиш не печатал. Более ста лет рукописи пролежали в библиотеке Кембриджского университета, пока их не извлек Максвелл и не опубликовал. К этому времени закон взаимодействия зарядов был установлен во Франции Кулоном и с тех пор носит его имя.

Кулон пришел к цели более простым, хотя и менее строгим путем, чем Кевендиш. Мы остановимся на экспериментах Кулона.

Открытию закона Кулоном способствовало то обстоятельство, что силы взаимодействия между зарядами велики. Поэтому здесь не нужно было применять особо чувствительную аппаратуру, как при проверке закона тяготения в земных условиях. Несложное устройство, получившее название крутильных весов Кулона, позволило ответить на вопрос, как взаимодействуют друг с другом неподвижные заря-



женные тела. Крутильные весы — это просто подвешенная на тонкой упругой проволочке палочка, на одном конце которой закреплен заряженный металлический шарик, а на другом — противовес. Еще один шарик закреплен возле весов неподвижно. Сила взаимодействия измерялась по закручиванию проволочки, и исследовалась зависимость силы от расстояния и величины зарядов. Измерять силу и расстояние умели. Единственная трудность была с зарядом. Кулон поступил просто и остроумно. Он менял величину заряда одного из шариков в 2, 4 и т. д. раз, соединяя его с таким же незаряженным шариком. Заряд при этом распределялся поровну между шариками, что и уменьшало величину исследуемого заряда в известном отношении. Одновременно наблюдалось, как изменяется сила.

Опыты Кулона привели к открытию закона, поразительно напоминающего закон тяготения. *Сила взаимодействия неподвижных заряженных тел прямо пропорциональна произведению их зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.* Сразу надо оговориться, что, как и ньютоновский

закон, закон Кулона справедлив только для «точечных» зарядов, т. е. для зарядов, геометрические размеры которых малы по сравнению с расстоянием между ними. Вообще же сила зависит от геометрических размеров и формы заряженных тел. Ее обычно называют кулоновской.

Открытие закона Кулона впервые позволило рассматривать заряд как определенное количество — измерять его.

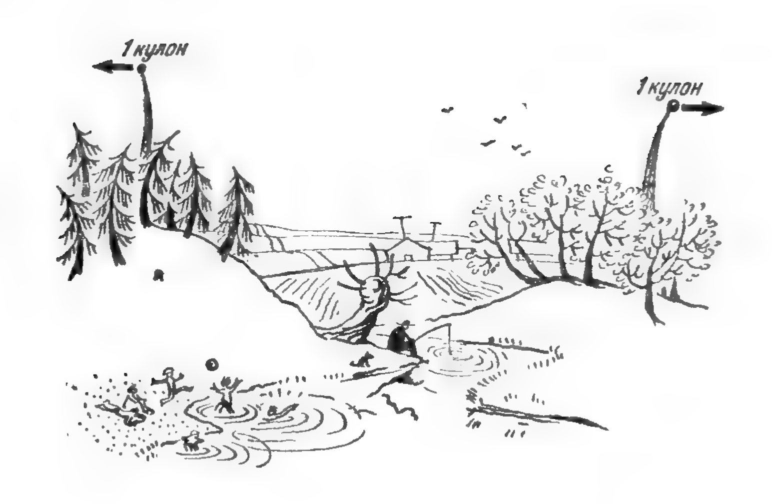
Для этого надо располагать единицей измерения. Эту единицу и дает возможность установить закон Кулона. Ведь создать эталон заряда, подобный эталону длины — метру, практически невозможно из-за всегда имеющейся утечки заряда. Естественно было бы за единицу заряда взять заряд электрона (это и сделано сейчас в атомной физике), но в то время ничего еще не было известно о прерывном строении электричества. За единицу заряда был принят такой заряд, который действует на равный себе в пустоте на расстоянии 1 сантиметра с силой в одну единицу — дину *). В этой системе единиц заряд электрона равен $4{,}8 \cdot 10^{-10}$. Это весьма и весьма малая величина.

Кулоновские силы медленно убывают с расстоянием и принадлежат к дальнодействующим, как и ньютоновские.

Но наряду со сходством законов имеются и серьезные различия. Прежде всего, это существование зарядов двух знаков, в то время как гравитационная масса всегда положительна. Наряду с притяжением электрических зарядов бывает и отталкивание.

Далее, между нейтральными телами кулоновские силы не действуют и поэтому не являются столь же универсальными, как силы всемирного тяготения. Универсальность их проявляется лишь в том, что один и тот же закон справедлив для взаимодействия как макроскопических тел, так и отдельных элементарных частиц. Это выяснилось сразу же после того, как эти частицы были открыты. С современной точки зрения справедливость закона Кулона для макроскопических зарядов имеет место именно потому, что

*) На практике часто используется единица заряда кулон, которая в $3 \cdot 10^9$ раз больше данной.



он непосредственно выполняется для элементарных частиц.

Еще одной важнейшей особенностью кулоновских сил является их величина. Электрические силы между отдельными элементарными частицами, как уже упоминалось раньше, неизмеримо больше гравитационных. Если бы удалось передать 1% электронов от одного человека другому, то на расстоянии вытянутой руки сила притяжения между ними превышала бы вес земного шара. Однако взаимодействие между заряженными частицами настолько велико, что создать у небольшого тела очень большой заряд невозможно. Отталкиваясь друг от друга с большой силой, частицы не смогут удержаться на теле. Никаких же других сил, которые были бы способны в данных условиях компенсировать кулоновское отталкивание, в природе не существует. Вот одна из причин, почему заметное притяжение или отталкивание больших заряженных тел не встречается в природе. Кроме того, заряженные тела проявляют очень большую склонность к нейтрализации. С большой жадностью впитывают они заряды противоположного знака, притягивая их к себе.

Большинство тел в природе электрически нейтрально. Впрочем, сама Земля имеет отрицательный заряд около $6 \cdot 10^5$ кулонов. В чистом виде кулонов-

ские силы работают главным образом внутри нейтральных атомов и в заряженных атомных ядрах. Но об этом мы будем говорить в дальнейшем.

Подчеркнем еще, что знакомство с законом Кулона — это первый конкретный шаг в направлении изучения свойств электрического заряда и тем самым в выяснении смысла самого понятия электрического заряда. Наличие электрического заряда у элементарных частиц или тел означает, что они взаимодействуют друг с другом по закону Кулона.

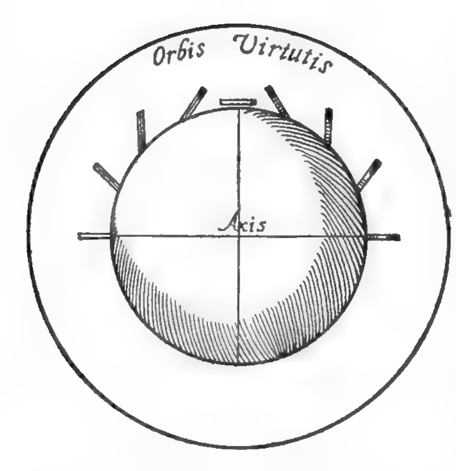
4.

Взаимодействие магнитов

Трудно найти человека, которого в детстве не поражали удивительные свойства магнита. На значительном расстоянии, прямо через пустоту (не воздух же ему помогает!) магнит способен притягивать тяжелые куски железа. Из гвоздиков и кнопок легко соорудить целые гирлянды. Не менее удивительно поведение магнитной стрелки компаса, упорно стремящейся повернуться на север, как бы вы ни вращали компас, стремясь сбить ее с толку. Пожалуй, только необыкновенные способности волчка могут соперничать с магнитом по действию на воображение.



Притяжение магнитов напоминает притяжение на рас-



стоянии наэлектризованных тел. Недаром на протяжении многих веков их путали. Лишь Гильберту в конце XVI века удалось доказать, что это не одно и то же. В самом деле: магнит не нуждается в таких предварительных операциях, как трение, для того, чтобы притягивать. И эта способность его не исчезает с течением времени, как у наэлектризованных тел, если только не нагревать его очень сильно и не трясти.

Магниты могут как притягиваться, так и отталкиваться, подобно зарядам. Но вот что странно! Отделить северный магнетизм от южного, получить изолированный магнитный полюс никому не удалось, несмотря на то, что на это было затрачено немало усилий.

Притяжение магнитов обычно значительно превосходит притяжение наэлектризованных тел. По-видимому, именно поэтому им приписывались поистине чудодейственные способности, приписать которые более слабому электрическому притяжению не решались. Так, например, полагали, что магнит способен исцелять болезни *), примирить мужа и жену и т. д. Даже и теперь многие верят в целительную силу «магнитных браслетов».

Как и в случае электрического притяжения, научного исследования свойств магнитного взаимодействия длительное время не велось. Чего, например, стоило удивительное мнение, что действие магнита прекратится, если натереть его чесноком. Лишь начиная с Гильберта исследование магнитов было поставлено на строгую научную основу. Именно Гиль-

*) Вопрос о влиянии магнитного поля на растения и животных обсуждается сейчас с новым интересом.

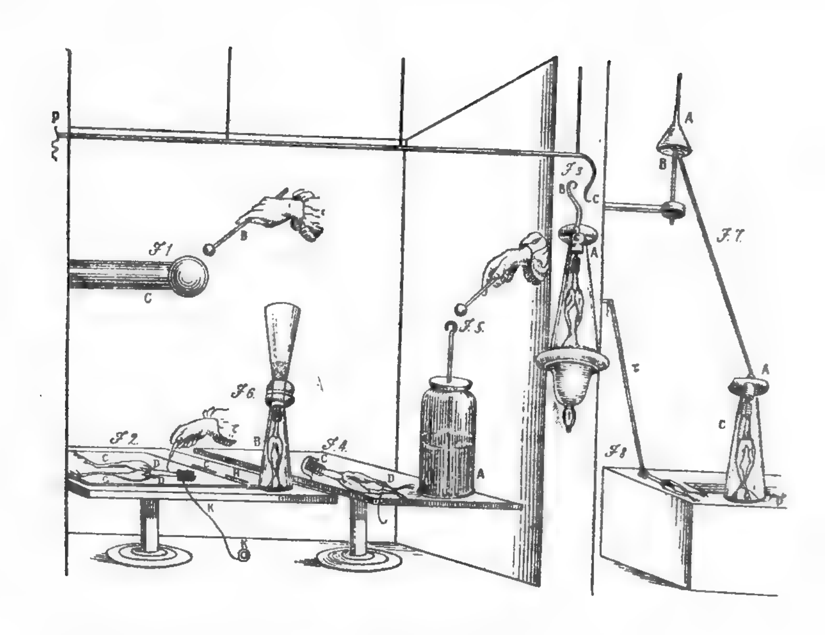
берт догадался, что земной шар является гигантским магнитом, и поэтому магнитная стрелка ориентируется определенным образом. Гильберт сумел подтвердить свою догадку экспериментально, намагнитив большой железный шар (он назвал его «терелла» — маленькая Земля) и наблюдая его действие на стрелку. Положение небольших магнитов по отношению к терелле Гильберт изобразил на рисунке в книге «О магните».

Количественно взаимодействие магнитов изучил Кулон, используя тот же метод, что и при изучении взаимодействия зарядов. Кулон нашел закон взаимодействия полюсов длинных магнитов, рассматривая полюса как места сосредоточения магнитных зарядов — аналогов зарядов электрических. Закон этот оказался таким же, как и закон взаимодействия электрических зарядов. Невозможность разделить северный и южный полюса магнита Кулон объяснял неспособностью магнитных зарядов противоположного знака внутри молекул вещества свободно передвигаться из одной молекулы в другую.

Можно было думать (сам Кулон так и думал), что здесь мы имеем дело с таким же фундаментальным законом, как и в случае взаимодействия неподвижных электрических зарядов. Введя новую величину — магнитный заряд,— Кулон считал, что открытие закона взаимодействия магнитных зарядов исчерпывает проблему магнетизма. Никаких видимых оснований сомневаться в этом не было. Действовал Кулон по готовому «шаблону» — закону Ньютона для взаимодействия гравитационных масс. Почему же, спрашивается, этот «шаблон» в одном случае мог привести к открытию нового фундаментального закона, а в другом случае — нет?

Электрический ток и «животное электричество»

В действительности все оказалось гораздо сложнее. Природа сумела преподнести здесь исследователям один из своих очередных сюрпризов, на которые она весьма и весьма щедра. Человеческому воображению за ней трудно угнаться. Разгадка магнетизма пришла совсем с другой стороны. Это случилось после того, как научились создавать электрический ток —



поток движущихся электрических зарядов — значительной силы, продолжающийся достаточно большое время. История этого открытия не лишена интереса и связана с поисками так называемого «животного электричества».

Все началось с разряда лейденской банки — этого первого конденсатора. Открывший это явление Мушенброк первым испытал на себе самом действие электрического разряда. «Рука и все тело поражаются столь страшным образом, что и сказать не могу,— сообщает Мушенброк.— Одним словом, я думал, что пришел конец». Он даже советует друзьям «самим никогда не повторять этот новый и страшный опыт».

В действительности этот опыт не так уж страшен: кратковременный электрический ток, возникающий при разряде банки, не опасен для жизни. Как бы то ни было, физиологическое действие электрического разряда сразу же приковало к себе всеобщее внимание. Наряду с многими ценными наблюдениями возникла масса примитивных теорий, объясняющих и жизнь, и болезни, и смерть действием электричества. Интересные и верные открытия перемежались с са-

мыми забавными заблуждениями. Так, правильно было объяснено поражающее действие электрического ската и других электрических рыб как явление, аналогичное разряду лейденской банки. Но одновременно с этим действительно существующим «животным» электричеством обнаруживали «электрических» людей, птиц, домашних животных. Здесь экспериментаторов вводило в заблуждение электричество, возникающее при трении одежды людей, перьев или шерсти животных.

В этой обстановке тщательно обдуманные опыты выдающегося экспериментатора Гальвани позволили сделать фундаментальное открытие. Правда, самому Гальвани не удалось правильно истолковать свои собственные опыты, но повторивший их Вольта оказался способным к великому открытию, сразу давшему мощный толчок всему развитию учения об электромагнетизме.

Первое открытие возникло случайно. «Я разрезал и препарировал лягушку, как указано на рис. 2 таблицы I,— пишет Гальвани,— и, имея в виду совершенно другое, поместил ее на стол, на котором находилась электрическая машина, рис. 1, при полном разобщении от кондуктора последней и на довольно большом расстоянии от нее. Когда один из моих помощников острием скальпеля случайно очень легко коснулся внутренних бедренных нервов этой лягушки, то немедленно все мышцы конечностей начали так сокращаться, что казались впавшими в сильнейшие тонические судороги. (Причем это происходило в тот момент, когда из кондуктора машины извлекалась искра. *Прим. авт.*) Тогда я зажегся,— продолжает Гальвани,— невероятным усердием и страстным желанием исследовать это явление и вынести на свет то, что было в нем скрыто».

Вскоре Гальвани заметил, что сокращение лягушечьей лапки, соединенной с громоотводом, происходило во время ударов молнии и даже при появлении грозовых облаков.

По существу в этих опытах впервые наблюдалось явление электромагнитной индукции, открытое впоследствии Фарадеем. Но в то время дать верное объяснение происходящему было еще невозможно.

Открытие, сообщившее мощный толчок развитию электромагнетизма, состояло в другом.

Гальвани пытался обнаружить действие атмосферного электричества в ясную погоду. Для этого он повесил препарированную лягушку на железный забор, причем медный крючок проходил через спинной мозг лягушки. Прижимая крючок к перилам, Гальвани обнаружил сильное сокращение мышц. К счастью, он сумел догадаться, что дело здесь не в атмосферном электричестве. Сокращение наблюдалось всегда, когда прикасались к лапке лягушки двумя разнородными металлами, находящимися между собой в контакте.

Зная, что сокращение мышц возникает при электрическом разряде, Гальвани решил, что открыл животное электричество, вырабатываемое в организме. Металлический проводник, думал Гальвани, позволяет электричеству быстро переходить из одних частей мышцы в другие, что и вызывает сокращение.

Правильное объяснение открытому явлению дал соотечественник Гальвани Вольта. Это объяснение привело Вольта к созданию первого источника постоянного тока. В этом-то, в основном, и состояло все значение для физики открытия Гальвани. Вольта осенила блестящая догадка. Лягушечьи лапки — это лишь чувствительный «животный электрометр», более чувствительный, чем любой другой, и только. Источником же электрического тока служит контакт двух разнородных металлов, приведенных в соприкосновение с электропроводящей жидкостью животных тканей. Отсюда Вольта извлек идею первого гальванического элемента: набор медных и цинковых кружочков, переложенных смоченным соленой водой сукном. Это был «вольтов столб» — «самый замечательный, — по словам Араго,— прибор, когда-либо изобретенный людьми, не исключая телескопа и паровой машины».

Любопытно, что ни сам Вольта, ни его современники не имели ни малейшего представления о том как и почему данный прибор работает. Впрочем для развития науки в то время это было не так уж важно. Главное, что вольтов столб позволял получать

постоянный электрический ток, т. е. имел способность приводить в движение электрические заряды внутри проводника. Объяснение его действия было дано не скоро. Не будем останавливаться на нем и мы.

Открытие Эрстеда

Вольтов столб оказался поистине «рогом изобилия». Новые открытия непрерывно следовали друг за другом. Дэви разложил током щелочи и получил металлический натрий и калий, Петров открыл электрическую дугу, и т. д. Наконец, Эрстед в 1820 г. сделал самое важное открытие. Поместив магнитную стрелку вблизи провода с током, Эрстед обнаружил, что она поворачивается.

Причем это уже не было случайным открытием. Еще в 1807 г. Эрстед поставил себе целью изучить, оказывает ли электричество какое-либо воздействие на магнит. «Настойчивость, с которой он... стремился к своей цели, была вознаграждена открытием одного факта, существование которого никто, кроме него, даже отдаленно не мог предполагать, но который, став известным, не замедлил привлечь внимание всех, могущих оценить его важность и значение» (М. Фарадей).

Между случайно открытой пастухами древности удивительной способностью кусков железа притягиваться на расстоянии и подрагиванием лягушечьей лапки в опытах Гальвани была найдена прямая связь. Магнетизм и электричество обнаружили глубокое родство, и это было доказано прямым опытом. Причем к покоящимся зарядам магнитная стрелка оставалась совершенно равнодушной. Лишь движущиеся заряды способны были пробудить в ней «родственные эмоции». Магнетизм связан не со статическим электричеством, а с электрическим током.

Магнитное взаимодействие есть взаимодействие электрических токов

Открытие Эрстеда почти тотчас же позволило решить загадку магнетизма и одновременно найти еще один — наряду с кулоновским — фундаментальный тип взаимодействия электрических зарядов. Все это сделал один человек — Ампер — буквально в несколько месяцев сразу же после знакомства с опытом Эрстеда. Интересен ход

мысли этого гениального человека, запечатленный в его сообщениях, которые следовали одно за другим во Французской академии наук. Сначала под непосредственным впечатлением от наблюдения поворачивающейся вблизи тока магнитной стрелки Ампер предположил, что магнетизм Земли вызван токами, обтекающими Землю в направлении с запада на восток. Главный шаг был сделан. Магнитные свойства тела можно объяснить циркулирующим внутри него током. Далее Ампер пришел к общему заключению: *магнитные свойства любого тела определяются замкнутыми электрическими токами внутри него*. Этот решающий шаг от *возможности* объяснения магнитных свойств токами к категорическому *утверждению*, что магнитное взаимодействие — это взаимодействие токов,— свидетельство большой научной смелости Ампера.

Согласно гипотезе Ампера, внутри молекул, слагающих вещество, циркулируют элементарные электрические токи. Если эти токи расположены хаотически друг по отношению к другу, то их действие взаимно компенсируется, и никаких магнитных свойств тело не обнаруживает. В намагниченном состоянии элементарные токи в теле ориентированы строго определенным образом, так что их действия складываются.

Там, где Кулон видел неразделимые магнитные полюса молекул, оказались просто замкнутые электрические токи. Неразделимость магнитных полюсов полностью потеряла свою загадочность. Нет магнитных зарядов, и нечего делить. *Магнитное взаимодействие обусловлено не особыми магнитными зарядами, подобными электрическим, а движением электрических зарядов — током.*

Любопытно, что плодотворность идеи единства сил природы нигде, пожалуй, не проявилась так отчетливо, как при формулировке основных законов электромагнетизма. Вдохновленный этой идеей, Эрстед поднес магнитную стрелку к проводнику с током, а Ампер сумел мысленным оком увидеть внутри магнитного куска железа электрические токи. Эта же идея привела впоследствии Фарадея к новому величайшему открытию — открытию электромагнитной индукции.

Закон Ампера Ампер не только догадался, что при изучении магнитного взаимодействия нужно прежде всего исследовать взаимодействие электрических токов, но сам тут же занялся экспериментальным исследованием этого взаимодействия. В частности, установил, что токи одного направления притягиваются, а противоположно направленные — отталкиваются. Взаимно перпендикулярные проводники не действуют друг на друга.

Напряженные усилия увенчались в конце концов полным успехом. Ампер открыл закон механического взаимодействия между электрическими токами, решив тем самым проблему магнитного взаимодействия. Тот закон взаимодействия полюсов магнитов, который Кулон считал фундаментальным, оказался одним из бесчисленных следствий открытия Ампера. «Все в совокупности,— писал об Ампере Максвелл,— и теория и эксперимент, как будто появились в полной зрелости и полном вооружении из головы «Ньютона электричества». Эти исследования закончены по форме, идеальны по точности и резюмированы в формуле, из которой могут быть выведены все явления и которая навсегда должна остаться фундаментальной формулой электродинамики».

Мы не будем подробно рассказывать о тех экспериментах, которые привели Ампера к открытию взаимодействия токов, как это сделали для несравненно более простого случая взаимодействия неподвижных зарядов. Да нам и нет нужды формулировать закон Ампера для токов, как это было сделано им самим. Ведь электрический ток — это не что иное, как поток движущихся электрических зарядов. Значит, взаимодействие токов — это не что иное, как взаимодействие движущихся зарядов. Таким образом, наряду с взаимодействием Кулона, которое определяется только величиной зарядов и расстоянием между ними, при движении зарядов возникает новый тип взаимодействия. Оно определяется не только зарядами и расстоянием, но и скоростями движения зарядов. *Впервые в физике были открыты фундаментальные силы, зависящие от скоростей!*

Сила взаимодействия движущихся зарядов пропорциональна произведению этих зарядов, обратно

*пропорциональна квадрату расстояния между ними, как и в законе Кулона, но, сверх того, еще зависит от скоростей этих зарядов и направления их движения**). В открытии этого закона — весь смысл предыдущих усилий.

Магнитные силы существенно отличаются от электрических еще в одном отношении. Они не имеют центрального характера, как кулоновские и гравитационные. Это обнаружилось уже в опытах Эрстеда: магнитная стрелка не притягивалась к проводу и не отталкивалась от него, а поворачивалась. Открытая Ампером сила действует на движущиеся частицы в направлении, перпендикулярном их скорости.

Силы магнитного взаимодействия частиц гораздо слабее кулоновских в обычных условиях. Лишь при скоростях частиц, приближающихся к скорости света, они становятся сравнимыми. Тем не менее силы взаимодействия токов могут достигать очень большой величины. Достаточно вспомнить, что именно эти силы приводят во вращение якорь любого электромотора, даже самого большого. Более мощные кулоновские силы почти никак не проявляют себя в технике. Все дело в том, что мы можем создавать очень большие токи, т. е. приводить в движение (правда, сравнительно медленное) громадные количества электронов в проводниках. Создать же очень большие электростатические заряды не удается. Как это ни покажется странным, магнитные взаимодействия по сути дела только в технике играют основную роль (вспомним электромоторы). В природе же их роль по сравнению с кулоновскими, как мы увидим в дальнейшем, довольно скромна. Ведь это силы взаимодействия токов, которые редко в природе достигают большой величины.

Открытие Ампера расширяет наши представления об электрическом заряде. Обнаруживается новое фундаментальное свойство зарядов: способность взаимодействовать с силами, зависящими от скоростей движения.

*) Надо, разумеется, иметь в виду, что эти силы действуют наряду с кулоновскими, которые при движении отнюдь не исчезают.

5.

Близкодействие

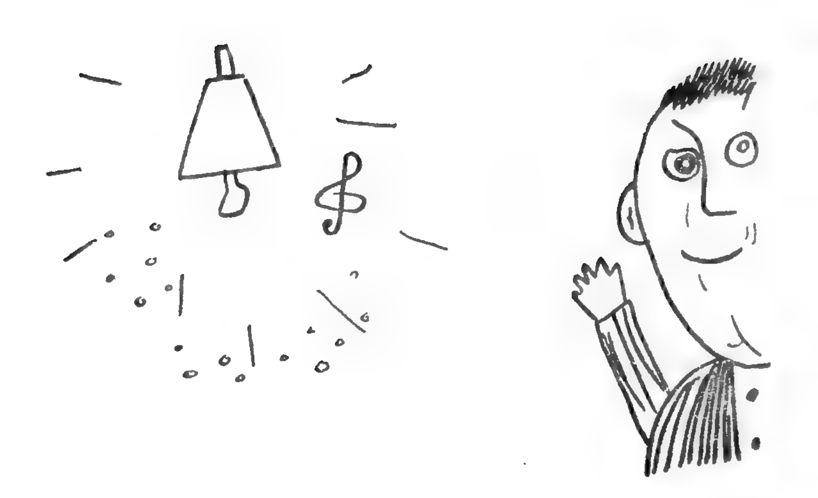
Законы взаимодействия неподвижных и движущихся зарядов были найдены. Но это не снимало вопроса, как передается сила от одного заряда к другому, подобно тому, как открытие закона всемирного тяготения не снимало вопроса о природе сил тяготения. Мы уже говорили о возникающих здесь проблемах, общих для гравитации и электромагнетизма. Однако эти проблемы настолько важны, что их стоит рассмотреть еще раз подробнее. Тем более, что они впервые исторически встали во весь рост именно при исследовании электромагнитных явлений.

Никто, пожалуй, не вскрыл существа дела с такой ясностью, как Максвелл в статье «О действиях на расстоянии».

Если мы наблюдаем действие одного тела на другое, находящееся на некотором расстоянии от него, говорит Максвелл, то прежде чем допустить, что это действие прямое и непосредственное, мы склонны сначала исследовать, нет ли между телами какой-либо материальной связи: нитей, стержней и т. д. Если подобные связи имеются, то мы предпочитаем объяснить действие одного тела на другое при помощи этих промежуточных звеньев.

Так, например, когда водитель исчезающих ныне старых автобусов поворачивает рукоятку, открывающую дверь, то последовательные участки соединительного стержня сжимаются, затем приходят в движение, пока наконец дверь не откроется *). В современных автобусах водитель заставляет дверь открыться, направляя по трубкам сжатый воздух в цилиндр, управляющий механизмом двери. Нетрудно также приспособить для этих же целей электромагнит, посылая ему сигналы по проводам. Во всех этих трех способах открывания двери есть общее: между водителем и дверью существует непрерывная

*) Пример, разумеется, не Максвелла. Никаких автобусов при его жизни еще не было.



соединительная линия, в каждой точке которой совершается некоторый физический процесс. Посредством этого процесса происходит передача действия, причем не мгновенно, а с той или иной конечной скоростью.

Итак, действие между телами на расстоянии во многих случаях, отмечает Максвелл, можно объяснить присутствием некоторых промежуточных агентов, передающих действие, наличие которых вполне очевидно. Не разумно ли, спрашивается, и в случаях, когда никакой среды, никакого посредника между взаимодействующими телами мы не замечаем, допустить существование некоторого промежуточного агента? *В этом состоит сущность концепции близкодействия.*

Ведь иначе придется сказать, что тело действует там, где его нет.

Кому не знакомы свойства воздуха, тот может подумать, что звучащий колокол непосредственно действует на наши уши, а передача звука невидимой средой — что-то совершенно непонятное. Однако здесь можно в деталях проследить весь процесс распространения звуковых волн и вычислить их скорость.

И вот, говорит Максвелл, многие умы погрузились в размышления о невидимых истечениях, ок-

ружающих планеты *) и магниты, о незримых атмосферах вокруг наэлектризованных тел. Размышления эти были подчас весьма остроумны, но обладали немаловажным недостатком: они оставались совершенно бесплодными, ничего не давая науке.

Действие на расстоянии

Так продолжалось до тех пор, пока Ньютон не установил своего закона всемирного тяготения, при этом, однако, не выдвинув какого-либо объяснения его действия. Последовавшие за этим успехи в исследовании солнечной системы настолько захватили воображение ученых, что они вообще в большинстве своем начали склоняться к мысли, что поиски какого-либо механизма не нужны.

Возникла концепция прямого действия на расстоянии непосредственно через пустоту. Тела способны непосредственно чувствовать присутствие друг друга без какой-либо среды.

Концепцию действия на расстоянии часто пытались поддержать авторитетом Ньютона, хотя это и не соответствовало действительности, как уже говорилось раньше.

Сторонников действия на расстоянии нисколько не смущала мысль о действии тела там, где его самого нет. Разве,— рассуждали они,— мы не видим, как магнит прямо через пустоту притягивает тела и при этом сила притяжения заметно не меняется, если магнит завернуть в бумагу или положить в деревянный ящик. Более того, даже если нам и кажется, что взаимодействие тел вызвано непосредственным контактом, то в действительности это не так. При самом тесном контакте между телами остается небольшой промежуток. Ведь груз, подвешенный на нити, не разрывает эту нить, хотя между отдельными атомами, слагающими ее, также пустота. Действие на расстоянии не только не невозможно, но это единственный способ действия, встречающийся повсюду.

Близкодействие существует не в природе, а лишь в головах сторонников этой концепции. Ведь это

*) Вспомните наш рассказ о гравитационных силах.



представление основано на грубом опыте донаучных времен, когда считали контакт необходимым для взаимодействия, но не понимали, что никакого прямого контакта не бывает, а существует действие на столь малых расстояниях, которые нельзя измерить при несовершенных методах наблюдения.

Аргументация против близкодействия, как видите, довольно сильная. Тем более, что она подкреплялась теми замечательными успехами, которых добились такие убежденные сторонники действия на расстоянии, как Кулон и Ампер.

Если бы развитие науки происходило прямолинейно, то никаких сомнений в окончательной победе действия на расстоянии не оставалось бы. Но в действительности линия развития скорее напоминает не прямую, а спираль. Пройдя один виток спирали, мы опять возвращаемся примерно к тем же представлениям, но уже на более высоком уровне. Именно так и произошло при развитии концепции близкодействия.

Успехи в открытии законов взаимодействия электрических зарядов не были органически связаны с представлением о действии на расстоянии. Ведь опытное исследование самих сил отнюдь не предполагает определенных представлений о том, как эти силы передаются. В первую очередь нужно было найти математическое выражение сил, а «объяснять» их можно было уже потом.

Успехи сторонников действия на расстоянии явились только первым указанием на беспочвенность попыток объяснять коренные законы природы теми или иными наглядными механическими картинками, заимствованными из действительно грубого, повседневного опыта.

Электромагнитное поле Фарадея

Решительный поворот к представлениям близкодействия был совершен Фарадеем — творцом основных идей теории электромагнетизма, а окончательно завершен Максвеллом. *Согласно Фарадею электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждый из них создает в окружающем пространстве электрическое и магнитное (если он движется) поля. Поля одного заряда действуют на другой и наоборот.*

В основе представлений Фарадея об электрическом поле было понятие о силовых линиях, которые расходятся во все стороны от наэлектризованных тел. Эти линии, дающие направление действия электрической силы в каждой точке, были известны уже давно. Их наблюдали и изучали как любопытное явление.

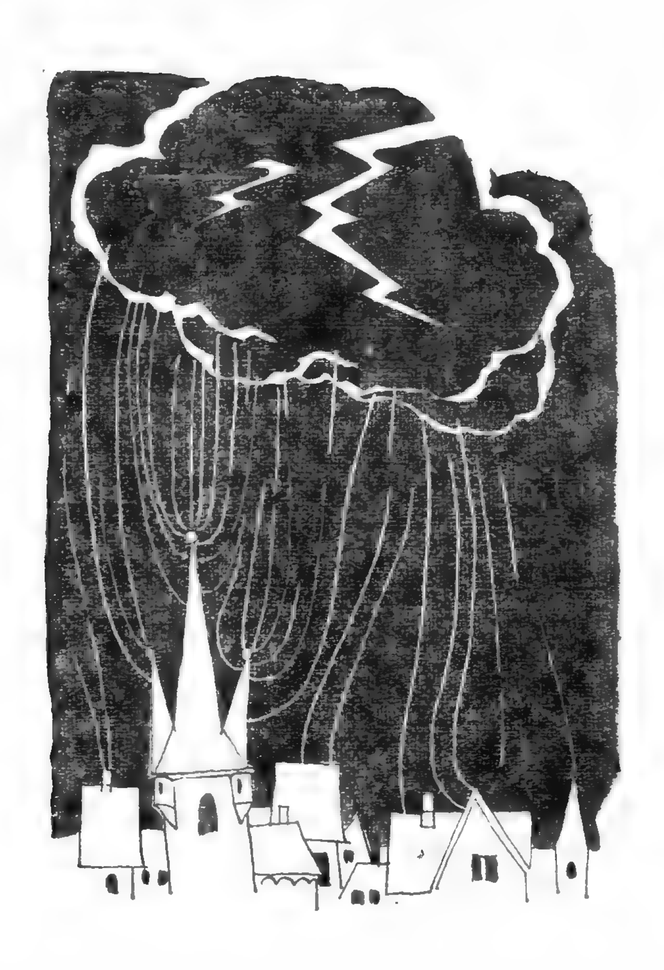
Если продолговатые кристаллики диэлектрика (например, хинина) хорошо перемешать в такой вязкой жидкости, как касторка, то вблизи заряженных тел эти кристаллики выстроятся в цепочки, образуя линии более или менее причудливой формы в зависимости от распределения зарядов.

Можно проследить силовые линии вблизи поверхности Земли перед началом грозы.

Точно так же можно наблюдать вблизи проводников с током магнитные силовые линии с помощью простых железных опилок.

Фарадей был первым, кто отказался рассматривать силовые линии просто как способ обнять одним взглядом направления равнодействующей сил дальнодействия от наэлектризованных тел или токов в различных местах: сложный результат простых законов. Силовые линии, по Фарадею,— это наглядное отображение реальных процессов, происходящих в пространстве вблизи наэлектризованных тел или магнитов. При этом он сообщил концепции силовых линий замечательную ясность и точность. Распределение силовых линий, по Фарадею, дает картину электрического поля вблизи зарядов или магнитного вблизи магнитов и проводников.

«Фарадей,— писал Максвелл,— своим мысленным оком видел силовые линии, пронизывающие все пространство. Там, где математики видели центры



напряжения сил дальнодействия, Фарадей видел промежуточный агент. Где они не видели ничего, кроме расстояния, удовлетворяясь тем, что находили закон распределения сил, действующих на электрические флюиды, Фарадей искал сущность реальных явлений, протекающих в среде». Не будучи математиком и не имея возможности проследить за развитием мысли таких блестяще эрудированных в математике коллег, как Ампер, Фарадей тем не менее с помощью силовых линий мог разобраться в самых сложнейших вопросах электродинамики. И нет сом-

нения в том, что именно эти идеи привели его к ряду открытий исключительной важности.

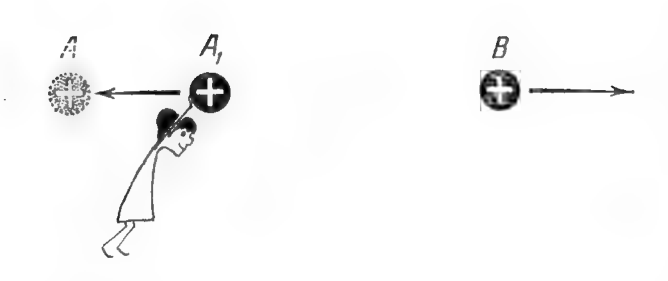
Современники, захваченные успехом работ Ампера и других авторитетов действия на расстоянии, отнеслись к идеям Фарадея довольно прохладно, одновременно с интересом следя за его экспериментальными открытиями. Вот что писал один из них: «Я никак не могу себе представить, чтобы кто-нибудь, имеющий понятие о совпадении, которое существует между опытом и результатами вычисления, основанного на допущении закона дальнодействия, мог бы хотя бы один момент колебаться, чему отдать предпочтение: этому ясному и понятному действию или чему-то столь неясному и туманному, как силовые линии».

Электромагнитное поле существует

Однако сторонники дальнодействия не долго могли гордиться математическим изяществом и точностью своих теорий. Великий соотечественник Фарадея Максвелл сумел придать идеям Фарадея точную количественную форму, столь необходимую в физике. Он написал ставшую бессмертной систему уравнений электромагнитного поля. Выяснилось, в частности, что открытые Кулоном и Ампером законы именно на языке поля выражаются наиболее полно, глубоко и одновременно математически изящно. С этих пор представления об электромагнитном поле начали завоевывать все большие и большие симпатии среди ученых. Но полная победа пришла несколько позднее, примерно через 50 лет после формулировки основных идей Фарадея.

Максвелл сумел теоретически показать, что электромагнитные взаимодействия распространяются с конечной скоростью, и эта скорость есть скорость света в пустоте: $c = 300\,000$ *км/сек*. Это означает, что если мы слегка передвинем некоторый заряд A, то сила Кулона, действующая на заряд B, изменится *не мгновенно, а спустя время* $t = \frac{AB}{c}$. Фундаментальный результат, ставящий крест на концепции дальнодействия. Между зарядами в пустоте действительно имеет место некоторый процесс *), в результате чего

*) Позднее мы разберем, что это за процесс.



взаимодействие между зарядами распространяется с конечной скоростью. Правда, подобный эксперимент трудно осуществить из-за большой скорости распространения процесса. Но в этом и нет нужды. Из теории Максвелла следовал фундаментальный факт: электромагнитное поле обладает своеобразной инерцией. При быстром изменении скорости заряда сопровождающее его поле отрывается от заряда подобно тому, как при резком ускорении поезда срываются со своих мест все незакрепленные предметы. Оторвавшиеся от заряда поля начинают существовать независимо в форме электромагнитных волн. В наше время это известно всем, ибо такой процесс происходит при работе любой радиостанции. Ее назначение состоит в излучении электромагнитных волн. И если станция прекратит работу, созданные ею электромагнитные волны еще долго будут блуждать в пространстве, пока не поглотятся телами.

В этом и подобных примерах электромагнитное поле выступает как нечто столь же реальное, как стол, за которым вы сидите, и отмахнуться от представлений о поле, как о чем-то сложном, запутывающем простые вещи, как думали сторонники дальнодействия, уже нельзя.

Идея о том, что тело может действовать непосредственно там, где этого тела нет, идея, которая в первый момент своего появления представлялась как противоречащая сама себе бессмыслица, была опровергнута экспериментально, несмотря на то, что, как казалось одно время, само развитие науки требует ее признания, а сковывающие творческую мысль догматы близкодействия должны быть отвергнуты.

6.

«Мучительный» вопрос

Что такое электрическое и магнитное поле? Этот вопрос является наиболее мучительным для человека, стремящегося понять существо тех основных величин, с которыми оперирует современная физика, но либо еще не успевшего заняться ее основательным изучением, либо уже потерявшего надежду работать в этой области. Недаром среди вопросов в разных конвертах, ежедневно заполняющих столы редакций научно-популярных журналов и издательств, этот вопрос встречается наиболее часто. Электрический заряд вопрошающих интересует гораздо меньше, хотя дело здесь обстоит ничуть не проще, чем с полем. Это, вероятно, происходит потому, что с зарядом связано нечто осязаемое — наэлектризованное тело, а с полем — нет.

Пишут по этому поводу разные люди, знакомые обычно с понятием поля по школьным учебникам и популярным статьям. Часто выражают недоумение, почему нигде не встречается такое определение поля, которое могло бы их удовлетворить. Не пишут только студенты. То ли они начинают понимать, что несколькими фразами здесь не отделаешься, то ли потому, что соответствующие разъяснения они могут получить на месте.

Электромагнитное поле и эфир

Положение здесь не простое. Первоначальные представления о силовых линиях, к которым пришел Фарадей, а вслед за ним и Максвелл, были рождены в эпоху триумфа ньютоновской механики. Она казалась универсальной и всеобъемлющей. Постулаты Ньютона давно перестали восприниматься как гипотезы, построенные на экспериментальном фундаменте. Их стали считать чуть ли не самоочевидными.

Ни Кулон, ни Ампер никогда не помышляли ни о каком отступлении от ньютоновских позиций. Ведь они только исследовали новые типы сил. Силам же

в ньютоновской теории разрешается быть какими угодно!

По существу на тех же позициях стоял и Фарадей, с той, правда, существенной разницей, что он не признавал действия на расстоянии. Фарадея не удовлетворяло умение только писать формулы, позволяющие выразить электромагнитные силы через расстояния, скорости и т. д. Он стремился наглядно представить себе *механизм* возникновения этих сил. Механизм, заметим, в самом буквальном смысле слова. Это (наряду с опытами с железными опилками и кусочками диэлектрика) и привело Фарадея к представлению о силовых линиях, как о чем-то очень напоминающем обычные (пусть невидимые и вообще ускользающие от прямого контроля органами чувств) упругие нити.

Да, как это ни звучит парадоксально в наше время, и Фарадей и Максвелл стояли на позициях *механического* объяснения электромагнитных явлений!

Приняв гипотезу, согласно которой все пространство заполнено особой всепроникающей средой — эфиром, они пытались все электромагнитные явления свести к механическим движениям в эфире, к механическим напряжениям внутри него. Многое в нынешней теории напоминает об этом. По сей день в книгах пишут (правда, вкладывая в слова новый смысл) о «натяжениях», связанных с электромагнитным полем, о потоках и вихрях.

Судьбы научных открытий бывают порой поразительны. Фурье, например, опираясь на совершенно ошибочное представление о теплороде — жидкости, якобы являющейся носителем тепла,— создал правильную математическую теорию теплопроводности. Мы пользуемся этой теорией и поныне. Фарадей и Максвелл создали стройное здание теории электромагнетизма, опираясь на механические представления.

В этом последнем случае логика развития идей была особенно удивительной. Эфир оказался совершенно нежизнеспособным детищем. Можно было еще смириться с необходимостью приписать ему экзотические свойства. Например, наряду с огромной

упругостью — ничтожную плотность и вязкость. Но постепенно выяснились обстоятельства, бросающие вызов не только требованиям наглядности (это не так уж страшно), но и самой логической цельности теории. Так, в одних опытах эфир (если он существует) должен был увлекаться вслед за движущимися телами. Полностью увлекаться! Из других опытов следовало, что увлечение является частичным. Наконец, были и такие эксперименты, которые столь же безапелляционно говорили: никакого увлечения нет! Гипотетическая среда оказалась совершенно неуловимой.

Эфир и теория относительности

Эти противоречия пошатнули успевшие укорениться привычные представления физиков об эфире. Окончательно идея механического эфира была похоронена теорией относительности Эйнштейна. *Выяснилось, что нельзя не только построить сколько-нибудь удовлетворительной механики эфира, но даже обнаружить движение по отношению к нему.*

Замечательно, что это не сдвинуло ни одного кирпичика в стройном здании математически сформулированных Максвеллом законов электромагнитного поля. Уравнения остались прежними! Или, лучше сказать, они сохранили прежний внешний вид, но смысл их, смысл терминов «электрическое поле», «магнитное поле» стал совсем другим. Так, силовые линии в современной теории — это наглядное изображение распределения поля в пространстве, но никак не натянутые струны незримого механизма. В этом смысле они не более реальны, чем меридианы и параллели на географическом глобусе.

Есть старый анекдот о том, как действует беспроволочный телеграф. «Представьте себе колокольчик. К нему привязана веревка. Другой ее конец я держу в руке. Дергаю за веревку. Колокольчик звенит. Понятно? Ну, а теперь то же самое, но только без веревки».

Эфир для многих физиков был той самой веревкой, которая делала все привычным и понятным. «Та же самая» электродинамика, но «без веревки» потребовала переосмысливания многих представлений.

Можно сказать, что сторонники дальнодействия в одном все же оказались правы. Отрицая промежуточный агент, обусловливающий взаимодействие, они ошибались. Но они были вместе с тем правы, высмеивая попытки объяснить эти взаимодействия неким невоспринимаемым механизмом, механизмом, который должен быть сконструирован так, чтобы он давал как раз то, что мы наблюдаем в действительности, но ничего больше. Если нет эфира, то не приходится надеяться на возможность свести электромагнитные явления к механике, пусть очень своеобразной, изощренной, но все же ньютоновской механике.

Но если это так, то, следовательно, мы, изучая электромагнитное поле, сталкиваемся с какой-то материей (а в материальности электромагнитного поля сомневаться не приходится), которая *не подчиняется законам Ньютона*! Она описывается своими специфическими законами, математической записью которых являются уравнения Максвелла.

Это одно из фундаментальнейших открытий! Впервые за всю историю науки в современном смысле этого слова появилась глубокая идея: существуют разные сорта материи, и каждый из них описывается своими законами, не похожими на другие, хотя в некоторых пунктах и соприкасающимися. Днем рождения этой идеи стал день изгнания из физики механического эфира.

Но что же это за материя? Какое определение можно дать понятиям электрического и магнитного поля?

Что значит объяснить!

Теперь вам предстоит познакомиться с длинным и, вероятно, скучным рассуждением, единственная цель которого — оправдаться в том, что дать определение поля, которое сразу бы вас удовлетворило, невозможно.

Вспомните, как можно объяснить, что представляет собой та или иная вещь? Конечно, первое, что приходит в голову,— это просто *указать* на нее пальцем (хотя это и не всегда прилично), и тогда *органы чувств* собеседника без всякой помощи с вашей стороны сообщат ему массу ценных сведений. Если объекта нет под рукой или он невидим, то (это уж будет во-вторых) можно подробно *рассказать о его*

свойствах. Наконец, если это потребуется, можно рассказать, из чего состоит предмет вашего разговора: рассказать о *строении предмета.*

Мы привыкли к тому, что можно пользоваться любым из этих способов. В некоторых случаях предпочтительнее один, в других — другой. Например, довольно трудно объяснить, что такое жирафа, но достаточно посмотреть на нее один раз, и вы никогда ее ни с чем не спутаете. Наоборот, знакомство с переживаниями человека, попавшего в снежную лавину в горах, предпочтительнее получить по рассказам. О таком объекте, как атом, проще всего составить представление, ознакомившись с его строением. Кстати, здесь первый способ вообще не пригоден. Атом настолько мал, что ни увидеть, ни ощупать его невозможно.

Часто все три способа пригодны в равной мере, и вы можете выбрать любой из них в зависимости от характера и степени интереса, внушенного вам предметом.

Например, желая узнать, что такое глюкоза, вы можете раскрыть энциклопедию или другое руководство и ознакомиться с описанием ее свойств. Так вы узнаете, что это бесцветные кристаллы, плавящиеся при температуре 146°С; на вкус примерно в два раза менее сладкие, чем свекловичный сахар, и т. д. Список свойств будет весьма обширным.



Далее, вы можете познакомиться с ее строением. Здесь выяснится, что глюкоза состоит из углерода, водорода и кислорода. Молекула глюкозы содержит шесть атомов углерода, шесть — кислорода и двенадцать атомов водорода, связанных друг с другом определенным образом.

Наконец, можно просто раздобыть кристалл глюкозы и посмотреть, что это такое.

Наиболее глубокое, полностью удовлетворяющее ученого или интересующегося наукой человека представление

о предмете он получает при знакомстве со строением предмета. Особенно, если на основе этого строения можно объяснить различные свойства предмета. В этом главным образом и состоит цель науки.

Первичные сущности

Однако имеются объекты, для объяснения сущности которых ни первый, ни третий способы не годны. Такие объекты непосредственно не воспринимаются нашими органами чувств, и мы ничего не можем сказать об их строении. Именно к таким объектам относятся электрические и магнитное поля. То, что эти поля не действуют на органы чувств, еще не так страшно, хотя и не легко убедиться в реальности того, что мы непосредственно не ощущаем. Ведь мы и атомы не воспринимаем органами чувств, но с ними можно свыкнуться довольно легко. С полем дело обстоит сложнее в том смысле, что о его строении ничего сказать нельзя. Такая ситуация совершенно непривычна. Она имеет место только для простейших объектов (стихий, как говорили древние), которые нам известны на сегодняшний день. *Ничего более первичного, чем электромагнитное поле, мы не знаем.* Именно поэтому ничего не можем сказать о его строении.

На любом этапе развития науки мы сталкиваемся с подобного рода простейшими сущностями, разложить которые на составные элементы нельзя по той простой причине, что таковые не известны. Античные философы принимали за первичные четыре стихии: воду, воздух, огонь и землю. Впоследствии это были атомы, а теперь элементарные частицы и поля. Вопрос может стоять только так: будут ли в дальнейшем открыты более простые объекты, которые можно было бы рассматривать в качестве составных частей полей и частиц? Ничего абсолютно достоверного здесь пока сказать нельзя.

Надо сразу же предостеречь от попыток слишком упрощенно представлять себе поле. С элементарной частицей так и хочется связать этакий наглядный образ: шарик или нечто подобное, резко очерченное в пространстве, прерывное. С полем же связывается само собой в нашем мозгу нечто непрерывное, заполняющее пространство подобно тому, как жидкость

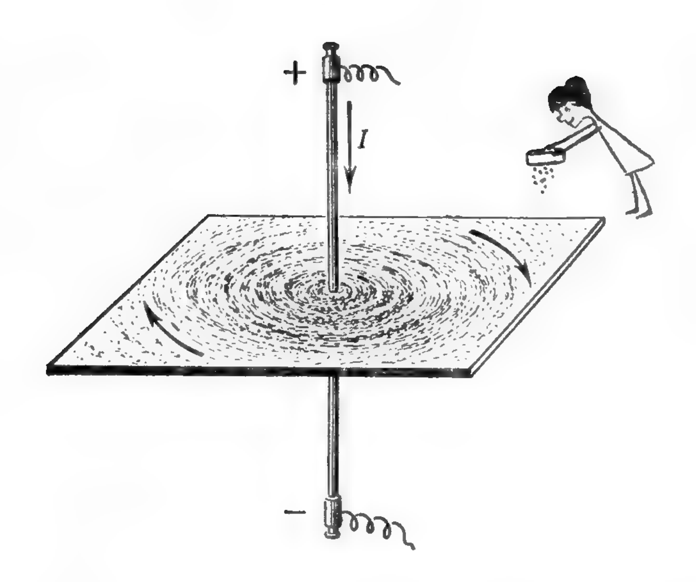
заполняет сосуд. Именно такие представления господствовали в науке конца прошлого века: электрон рассматривали как заряженный шарик, а электромагнитное поле — как натяжения особой гипотетической среды — эфира. Однако в действительности такая простая картина недопустима. Достаточно сказать, что, как установлено в настоящее время, электромагнитное поле обнаруживает присущие частицам свойства, а у элементарных частиц в свою очередь обнаруживаются типично волновые свойства. Однако не будем забегать далеко вперед. Иначе нам придется касаться таких сложных свойств поля, говорить о которых пока преждевременно.

Основные свойства электромагнитного поля

Теперь можно перейти к существу вопроса об электрическом (точнее, пока об электростатическом) поле. *Наши представления о том, чтó такое электрическое поле, образуются в результате опытного исследования его свойств.* Иным путем эти свойства не могут быть найдены. *Главное свойство электрического поля — это способность действовать на электрические заряды (как неподвижные, так и движущиеся) с некоторой силой.* По действию на заряд устанавливается присутствие поля, распределение его в пространстве, изучаются все его характеристики.

Создается электрическое поле электрическими зарядами. Принято считать, что силовые линии этого поля начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных. Заряды — источники поля. По действию поля на заряд мы можем не только обнаружить поле. Исследуя это действие, можно ввести строго определенную величину, позволяющую *измерять* поле. Эта величина — напряженность поля — сила, действующая на единичный положительный заряд.

Основное свойство магнитного поля — способность его действовать на движущиеся электрические заряды с определенной силой. Создается магнитное поле также только движущимися электрическими зарядами. Силовые линии магнитного поля охватывают токи в виде замкнутых линий, не имеющих ни начала, ни конца.



Максвелл на основе открытий Кулона и Ампера сформулировал точные законы, определяющие величину электрического и магнитного полей в зависимости от распределения в пространстве зарядов и токов.

Как относятся к фундаментальным понятиям ученые?

Полезно еще сказать несколько слов об отношении самих физиков к такого рода фундаментальным понятиям, как поле. То определение поля и перечисление его свойств, о которых шла речь, вероятно, многим покажется явно недостаточным. Не следует ли *в первую очередь* все силы направить на достижение большей ясности в вопросе о поле, попытаться выяснить детально его природу?

Точка зрения ученых на этот счет иная. В тех сведениях о поле, которыми мы располагаем, ученые *прежде всего* видят необъятные возможности для объяснения громадной совокупности опытных фактов. Только под этими сведениями надо понимать, конечно, точно сформулированные математические законы, определяющие конфигурацию поля в зависимости от расположения зарядов и их скоростей, а не только те качественные представления, о которых мы можем

рассказать в этой книге. Ученые отдают себе полный отчет в том, что здесь то же положение, что и с силами в механике Ньютона. Для механики, как вы помните, не важно, что́ есть сила по своей природе. Важно, чему она равна и при каких условиях возникает. В теории электромагнитного поля также важно в первую очередь знать, как поле действует на заряд и при каких условиях возникает, а не что̀ есть поле в себе. Разница лишь в том, что, выходя за рамки механики, мы можем исследовать природу сил, но поступить таким же образом с полем не в состоянии, во всяком случае сейчас.

Исследование природы различных механических сил заключается по существу в сведении их к тем или иным полям. Сами же поля, по крайней мере сейчас, нельзя свести к чему-то более элементарному.

Рано или поздно наши сведения о поле, несомненно, будут углублены. Но те сведения, которыми мы располагаем, не позволяют пускаться в дебри сомнительных предположений о том, каков «механизм» действия поля на заряды. Нужно удовлетвориться сказанным. Возврат к первым попыткам механического понимания поля невозможен. Стремление сразу постичь «самую сущность» поля, вместо длительного, трудного, крайне важного дела объяснения конкретных явлений на основе известного и поисков новых свойств поля, может только показаться похвальным, а в действительности от этого нужно освобождаться.

Отношение ученых к полю можно сравнить с отношением Собакевича к такому деликатному предмету, как «мертвые души». Собакевича прежде всего заинтересовала та выгода, которую он может из них извлечь. «Вам нужно мертвых душ? — спросил Собакевич (Чичикова) очень просто, без малейшего удивления, как бы речь шла о хлебе... — Извольте, я готов продать». (Гоголь, «Мертвые души») *). Во всяком

*) Да не подумает читатель, что ученый своим характером вылитый Собакевич. Сходство между ними не в цели использования «таинственных предметов», а в способности увидеть в них практически полезные вещи.

случае, к полю ученый относится совсем не по-маниловски.

Вы конечно помните, как Манилов пытался было постичь, что же такое «мертвые души», но, увидев, что ему это не по силам, ограничился опасениями, не будет ли их продажа или негоция «несоответствующей гражданским постановлениям и дальнейшим видам России». Получив заверение в противном, он совершенно успокоился.

Конечно, ученые стремятся глубже исследовать свойства поля. Но они отлично понимают, что природа хранит свои тайны гораздо лучше, чем Чичиков тайну «мертвых душ».

Строить гипотезы, подобные тем, что выдвигались дамами «приятными во всех отношениях» и чиновниками губернского города N по поводу «мертвых душ», ученые считают занятием мало сказать бесполезным, но и вредным. На таком пути можно только превратить науку в сочинительство занимательных историй, подобных по своей достоверности «Повести о капитане Копейкине» или истории «О похищении губернаторской дочки».

В настоящее время мы не можем даже наверняка утверждать, что в *дальнейшем* будут открыты сущности «более первичные», чем поля и элементарные частицы.

Природа неисчерпаема в своих свойствах. Неисчерпаем, как подчеркивал Ленин, электрон. Столь же неисчерпаемо по своим свойствам и электромагнитное поле. Поэтому процесс все более глубокого познания свойств поля не прекратится никогда. Но делимы ли до бесконечности известные на сегодня простейшие образования? Вся совокупность фактов говорит, что скорее всего нет. Если это так, то дальнейший прогресс в изучении полей и элементарных частиц будет связан только с обнаружением все более и более глубоких свойств. Мы пока остановились лишь на некоторых важнейших свойствах, еще не изложив всего, что известно о поле современной науке.

Теперь можно и нужно перейти к следующим фундаментальным свойствам электромагнитного поля.

7.

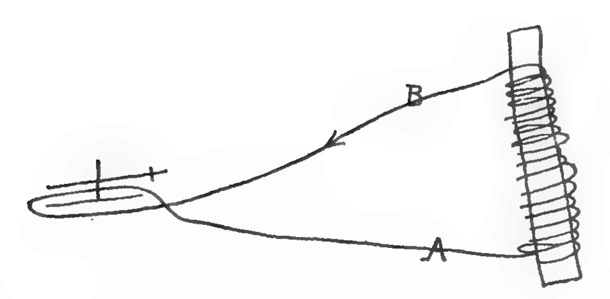
Новые свойства электромагнитного поля

Если бы неподвижные заряды создавали электрическое поле, а движущиеся — магнитное, и только, то семейство электромагнитных сил далеко не было бы столь обширным, каким оно является на самом деле. Более того, с достоверностью нельзя было бы утверждать, что эти поля — реальность, существующая в мире столь же несомненно, как, например, существование автора книги для ее читателей. Ученые (сторонники близкодействия) находились бы в положении начинающих авторов, не уверенных заранее, что у них найдутся читатели.

Только открытие новых свойств электромагнитных взаимодействий, которые уже без громадных натяжек нельзя было истолковать на языке дальнодействия (как это было сделано для законов Кулона и Ампера), совершенно изменило положение. Электрические и магнитные поля оказались теснейшим образом связаны. Магнитное поле способно в определенных условиях порождать электрическое без помощи зарядов, а электрическое — непосредственно порождать магнитное. Именно так: магнитное поле рождает только электрическое, а электрическое — только магнитное, которое, правда, в свою очередь может породить электрическое. Нечто похожее встречается в мире насекомых: гусеница превращается только в бабочку, а бабочка производит на свет только яйца, из которых вылупляются гусеницы, но никогда сами гусеницы не производят себе подобных непосредственно, так же как и бабочки.

Электромагнитная индукция

Не случайно, что первый и самый важный шаг в открытии этой новой стороны электромагнитных взаимодействий был сделан основоположником представлений об электромагнитном поле — одним из величайших ученых мира — Майклом Фарадеем. Фарадей был совершенно уверен в единстве электрических и магнитных явлений. Вскоре после открытия Эрстеда он записал в своем дневнике



(1821 г.): «Превратить магнетизм в электричество». С этих пор Фарадей, не переставая, думал над данной проблемой. Говорят, он постоянно носил в жилетном кармане магнит, который должен был напоминать ему о поставленной задаче. Через десять лет в результате упорного труда и веры в успех задача была решена. Им было сделано открытие, лежащее в основе устройства всех генераторов электростанций мира, превращающих механическую энергию в энергию электрического тока. Другие источники: гальванические элементы, аккумуляторы, термо- и фотоэлементы дают ничтожную долю вырабатываемой энергии.

Электрический ток, рассуждал Фарадей, способен намагнитить кусок железа. Для этого достаточно положить кусок внутрь катушки. Не может ли магнит в свою очередь вызвать появление электрического тока или изменить его величину? Долгое время ничего обнаружить не удавалось.

Какого рода случайности могли помешать открытию, показывает следующий любопытный факт. Почти одновременно с Фарадеем швейцарский физик Колладон также пытался получить электрический ток с помощью магнита. При работе он пользовался гальванометром, легкая магнитная стрелка которого помещалась внутри катушки прибора. Чтобы магнит не оказывал непосредственного влияния на стрелку, концы катушки, в которую Колладон вдвигал магнит, надеясь получить в ней ток, были выведены в соседнюю комнату и там присоединены к гальванометру. Вдвинув магнит в катушку, Колладон шел в эту комнату и с огорчением убеждался, что гальванометр показывает нуль. Стоило бы ему все время наблюдать за гальванометром и попросить кого-нибудь заняться

магнитом, замечательное открытие было бы сделано. Но этого не случилось. Покоящийся относительно катушки магнит мог лежать преспокойно внутри нее сотни лет, не вызывая в катушке тока.

С подобного рода случайностями сталкивался и Фарадей, потому что он неоднократно пытался получить электрический ток при помощи магнита и при помощи тока в другом проводнике, но безуспешно.

Открытие электромагнитной индукции, как назвал сам Фарадей это явление (по-русски слово «индукция» означает наведение), было сделано 29 августа 1831 г.*). Вот краткое описание первого опыта: «На широкую деревянную катушку была намотана медная проволока длиной в 203 фута, и между витками ее намотана проволока такой же длины, но изолированная от первой хлопчатобумажной нитью. Одна из этих спиралей была соединена с гальванометром, а другая с сильной батареей, состоящей из 100 пар пластин... При замыкании цепи удавалось заметить внезапное, но чрезвычайно слабое действие на гальванометре, и то же самое замечалось при прекращении тока. При непрерывном же прохождении тока через одну из спиралей не удавалось отметить ни действия на гальванометр, ни вообще какого-либо индукционного действия на другую спираль, несмотря на то, что нагревание всей спирали, соединенной с батареей, и яркость искры, проскакивающей между углями, свидетельствовали о мощности батареи» (М. Фарадей, «Экспериментальные исследования по электричеству», I серия).

Итак, первоначально была открыта индукция неподвижных друг относительно друга токов. Затем, ясно понимая, что замыкание и размыкание соответствуют сближению или удалению проводников с током, Фарадей экспериментально доказал, что ток возникает при перемещении катушек друг относительно друга.

Знакомый с трудами Ампера Фарадей понимал также, что ток — это магнит, а магнит в свою очередь — совокупность токов. 17 октября, как зареги-

*) Сравнительно редкий случай, когда столь точно известна дата нового замечательного открытия.

стрировано в его лабораторном журнале, был обнаружен индукционный ток в катушке в момент вдвигания (или выдвигания) магнита.

В течение одного месяца Фарадей экспериментально открыл все существенные особенности явления. «Его могучий ум обошел широкое поле и едва ли оставил для сбора последователям хотя бы крохи фактов»,— писал друг Фарадея Тиндаль. Оставалось только придать закону строгую количественную форму и полностью вскрыть физическую природу явления. Уже сам Фарадей уловил то общее, от чего зависит появление индукционного тока в этих, выглядевших внешне по-разному, опытах. *В контуре возникает ток при изменении числа силовых линий магнитного поля, пронизывающих площадь, ограниченную этим контуром* (в частности, при изменении величины магнитного поля, *пронизывающего контур*). И чем быстрее меняется это число, тем больше ток. Причина изменения числа силовых линий совершенно безразлична. Это может быть и изменение силы тока (а следовательно и его поля), и сближение катушек, и движение магнита.

Фарадей не только открыл явление, но и первым осуществил несовершенную пока еще модель генератора электрического тока, превращающего механическую энергию вращения в ток. Это был массивный медный диск, вращающийся между полюсами сильного магнита. Присоединив ось и край диска к гальванометру, Фарадей обнаружил отклонение стрелки. Ток был, правда, слаб, но найденный принцип позволил впоследствии построить мощные генераторы. Без них электричество и по сей день было бы мало кому доступной роскошью.

Направление индукционного тока и сохранение энергии

Возникший индукционный ток немедленно начинает взаимодействовать с породившим его током или магнитом. Если магнит (или катушку с током) приближать к замкнутому проводнику, то появляющийся индукционный ток обязательно отталкивает магнит. Для сближения необходимо совершить работу. При удалении магнита возникает притяжение. Это правило, подмеченное Ленцем, выполняется совершенно не-

укоснительно. Представьте себе, что дело обстояло бы иначе: вы подтолкнули магнит к катушке, он сам собой устремляется внутрь ее и... нарушался бы закон сохранения энергии. Ведь механическая энергия магнита увеличивалась бы и одновременно возникал бы ток, что само по себе требует затраты энергии, ибо ток тоже может совершать работу. Природа мудро распорядилась направлением индукционного тока, с тем чтобы запасы энергии не изменялись. Индуцированный в якоре генератора электростанции ток, взаимодействуя с магнитным полем статора, тормозит вращение якоря. Только поэтому для вращения якоря нужно совершать работу, тем бóльшую, чем больше сила тока. За счет этой работы и возникает индукционный ток.

Интересно отметить, что если бы магнитное поле нашей планеты было очень большим и сильно неоднородным, то быстрые движения проводящих тел на ее поверхности и в атмосфере были бы невозможны из-за интенсивного взаимодействия индуцированного в теле тока с этим полем. Тела двигались бы как бы в плотной вязкой среде и при этом сильно разогревались бы. Ни самолеты, ни ракеты не могли бы летать. Человек не мог бы быстро двигать ни руками, ни ногами, так как человеческое тело — неплохой проводник.

Если катушка, в которой наводится ток, неподвижна относительно соседней катушки с переменным током, как, например, у трансформатора, то и в этом случае направление индукционного тока диктуется законом сохранения энергии. Этот ток всегда направлен так, что созданное им магнитное поле стремится уменьшить изменения тока в первичной обмотке.

Природа электромагнитной индукции

Сразу после открытия Фарадеем закона электромагнитной индукции ученые стремились придать ему строгую количественную форму. Сейчас трудно представить себе те мучительные усилия, которые потребовались для формулировки этого закона на языке концепции действия на расстоянии. В конце концов были получены (Нейманом и Вебером) весьма и весьма сложные формулы, неясные по своему физическому содержанию,

но все же способные количественно описывать опытные факты. В настоящее время их можно найти только в книгах по истории физики.

Истинный смысл закона электромагнитной индукции был найден Максвеллом. Он же придал закону ту простую и ясную математическую форму, базирующуюся на представлении о поле, которой сейчас пользуется весь мир.

Попробуем представить себе, с помощью какого рода рассуждений Максвелл смог усмотреть в явлении электромагнитной индукции новое фундаментальное свойство электромагнитного поля.

Допустим, перед нами обыкновенный трансформатор. Включив первичную обмотку в сеть, мы немедленно получим ток в соседней вторичной обмотке, если только она замкнута. Электроны, находящиеся в проволоке обмотки, придут в движение.

Но ведь электронам закон электромагнитной индукции не известен. Короче говоря, какие силы приводят электроны в движение?

Само магнитное поле, пронизывающее катушку, этого сделать не может. Ведь магнитное поле действует исключительно на движущиеся заряды (этим-то оно и отличается от электрического), а проводник с находящимися в нем электронами неподвижен.

Правда, в действительности дело обстоит не так уж просто. И в неподвижном проводнике электроны совершают беспорядочное движение. Но средняя скорость такого движения равна нулю, так как число электронов, движущихся в любом заданном направлении, равно в среднем числу электронов, движущихся в противоположном направлении. Соответственно ток, вызванный непосредственно магнитным полем, должен быть также равен нулю.

Что же тогда действует?

Кроме магнитного, на заряды, мы знаем, действует еще электрическое поле. Причем оно-то как раз может действовать и на неподвижные заряды. Это его главное свойство. Но ведь то поле, о котором у нас шла речь (электростатическое поле), создается непосредственно электрическими зарядами, а индукционный ток появляется под действием переменного магнитного поля. Уж не замешаны ли здесь какие-то

новые физические поля, коль скоро идея близкодействия считается незыблемой?

Не будем спешить с выводами и при первом же затруднении искать спасения в придумывании новых полей, как в свое время выход из всех трудностей видели во введении новых сил. Ведь у нас нет никакой гарантии, что все главные свойства магнитного и электрического полей известны. В законах Кулона и Ампера, заключающих в себе основную информацию о свойствах поля, фигурируют постоянные поля.

А что если у переменных полей появляются новые свойства? Будем надеяться, что идея единства электрических и магнитных явлений, плодотворная до сих пор, не откажет и дальше.

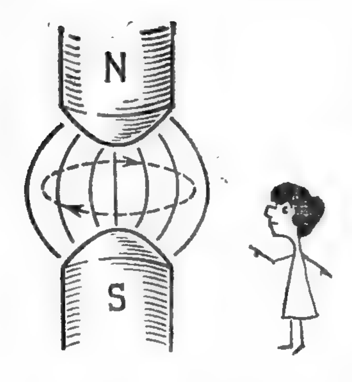
Тогда остается единственная возможность: предположить, что электроны ускоряются во вторичной обмотке *электрическим полем и это поле порождается переменным магнитным полем непосредственно в пустом пространстве*. Тем самым утверждается новое фундаментальное свойство магнитного поля: *изменяясь во времени, оно порождает вокруг себя электрическое поле*.

Теперь явление электромагнитной индукции предстает перед нами в совершенно новом свете. Главное — это процесс в пустом пространстве: рождение магнитным полем электрического. Есть ли проводящий контур (катушка) или нет, это не меняет существа дела. Проводник с его запасом свободных электронов — просто индикатор (регистратор) возникающего электрического поля: оно приводит в движение электроны в проводнике и тем самым обнаруживает себя.

Сущность явления электромагнитной индукции совсем не в появлении индукционного тока, а в возникновении электрического поля.

Вихревое электрическое поле

Возникающее при изменении магнитного поля электрическое поле имеет совсем другую структуру, чем электростатическое. Оно не связано непосредственно с электрическими зарядами, и его силовые линии не могут на них начинаться и кончаться. Они вообще нигде



не начинаются и нигде не кончаются, представляя собой замкнутые линии, подобные силовым линиям магнитного поля. Это так называемое вихревое поле.

При изменении поля сильного электромагнита появляются мощные вихри электрического поля, которые можно использовать для ускорения электронов до скоростей, близких к скорости света. На этом принципе основано устройство ускорителя электронов—бетатрона. Электрический ток в бетатроне возникает непосредственно в вакуумной камере без каких-либо металлических проводников.

Может возникнуть вопрос: а почему, собственно, это поле называется электрическим? Ведь оно имеет другое происхождение и другую конфигурацию, чем статическое электрическое поле. Ответ прост: вихревое поле действует на заряд точно так же, как и электростатическое, а это мы считали и считаем главным свойством поля.

Еще один естественный вопрос. Ведь все сказанное в конце концов не более чем предположение, достоверность которого совсем не самоочевидна. Может быть, в действительности дело обстоит и не так? Само-то электрическое поле мы не воспринимаем и судим о его присутствии только по силам, действующим на заряженные частицы!

Но это — уже по существу старое сомнение в реальности полей вообще, высказывавшееся сторонниками действия на расстоянии. Решительное его опровержение — существование электромагнитных волн, в самом процессе возникновения которых порождение электрического поля переменным магнитным полем играет фундаментальную роль.

Не все вопросы имеют смысл

Переменное магнитное поле рождает вихри электрического поля. Пусть так. Но не кажется ли вам, что одного утверждения здесь недостаточно? Хочется знать, а каков же *механизм* данного про-

цесса? Нельзя ли разъяснить, *как* эта связь полей осуществляется в природе? И вот тут-то ваша естественная любознательность не может быть удовлетворена. Никакого механизма здесь просто нет. Закон электромагнитной индукции — это фундаментальный закон природы. Значит, основной, первичный. Действием его можно объяснить массу явлений, но сам он остается необъяснимым, просто по той причине, что нет более глубоких законов, из которых бы он вытекал в виде следствия. Во всяком случае сейчас такие законы не известны. Такова уж судьба всех основных законов: закона тяготения, закона Кулона, закона Ампера и т. д.

Мы, конечно, вольны ставить перед природой любые вопросы, но не все они имеют смысл. Так, например, можно и нужно исследовать причины различных явлений, но пытаться выяснить, почему вообще существует причинность,— бесполезно. Такова природа вещей, таков мир, в котором мы живем.

О симметрии

Порождение электрического поля магнитным Максвелл усмотрел в явлении электромагнитной индукции. Следующий и уже последний шаг в открытии основных свойств электромагнитного поля был им сделан без каких-либо указаний со стороны эксперимента.

Точно не известно, какими соображениями руководствовался при этом Максвелл. Это могли быть те же самые соображения, которые заставили строителей Аничкова моста в Ленинграде поставить фигуры укрощаемых лошадей по обе стороны дороги, те же соображения, которые не позволяют вам перегружать вещами одну половину комнаты за счет другой. Это не что иное, как соображения симметрии, но только симметрии, понимаемой не в узком геометрическом смысле, а более широко.

Свойства симметрии глубоко заложены в природе, и, по-видимому, именно поэтому симметрия воспринимается нами как некая необходимая гармония окружающего мира.

В электромагнитных явлениях речь, конечно, идет не о той внешней красоте и изяществе, которая может быть присуща тому, что мы наблюдаем непосредственно с помощью органов чувств. Здесь речь может

идти о внутренней стройности, гармоничности, которую открывает природа перед человеком, стремящимся постичь ее изначальные законы. Чувствуя эту гармонию в природе, человек, естественно, стремится усмотреть ее и там, где факты пока еще не демонстрируют ее с полной наглядностью.

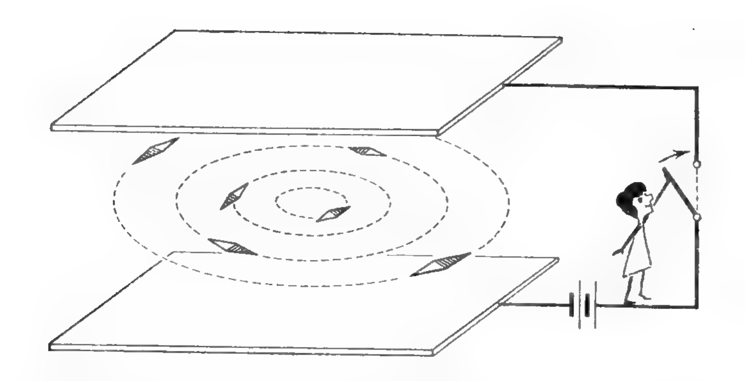
Магнитное поле рождает электрическое. Не существует ли в природе обратного процесса, когда переменное электрическое поле в свою очередь порождает магнитное? Это диктуемое соображениями симметрии предположение составляет основу известной гипотезы Максвелла о *токах смещения*.

Ток смещения

Максвелл допустил, что такого рода процесс реально происходит в природе. Переменное электрическое поле в пустоте или внутри диэлектрика было названо им током смещения. Током названо потому, что *это поле порождает магнитное поле точно так же, как и обычный ток*. (Этим начинается, этим же и кончается сходство тока смещения с током проводимости.) Добавка «*смещение*», с одной стороны, говорит нам, что это не обычный ток, а нечто специфическое, а с другой стороны, напоминает о том отдаленном времени, когда с изменением электрического поля в пустоте связывалось смещение частиц гипотетического эфира.

Утверждение Максвелла долгое время оставалось не чем иным, как гипотезой. Причем гипотезой, которую мы сейчас с полным правом можем назвать гениальной: экспериментально была доказана ее абсолютная справедливость.

Сейчас может показаться, что ничего нет в этом предположении необычайного, поражающего самой возможностью подобной догадки. Не мог ли ее высказать любой ученый? Нет! Не надо забывать, что сама возможность этой гипотезы возникла лишь после объяснения электромагнитной индукции на основе представлений о поле. И это в то время, когда большинство известных ученых вообще не придавало самому понятию поля сколько-нибудь серьезного значения и когда до момента экспериментального доказательства его существования оставалось еще более десяти лет.



Максвелл не только высказал гипотезу, но тут же сформулировал точный количественный закон, определяющий величину магнитного поля в зависимости от скорости изменения поля электрического.

Можно только изумляться той исключительной последовательности и настойчивости, той уверенности в правоте своих идей, которые проявил Максвелл при формулировке законов электромагнитного поля. Уже с самого начала, когда Максвелл начал заниматься электромагнетизмом после успешной работы в области молекулярно-кинетической теории вещества, он сразу решил читать только экспериментальные работы и не читать теоретических, чтобы ничего предвзятого не возникало в суждении о законах этих явлений. Такой способ действий оказался удивительно плодотворным и помог Максвеллу выработать собственную цельную точку зрения на электромагнитные процессы *). Максвелл смело положил в основу количественной теории объект (поле), экспериментальное существование которого не было доказано. И далее, идя шаг за шагом, опираясь на установленные опытным путем закономерности, он пришел к конечной цели. Гипотеза о токах смещения была последним принципиальным звеном. Здесь Максвелл

*) Но вряд ли такой способ может быть рекомендован сейчас для всеобщего употребления. Во-первых, в то время происходило рождение совершенно новой науки — электродинамики со своими специфическими особенностями. Рождение нового на месте, где раньше была пустота.

И, во-вторых, не каждый человек, к сожалению, Максвелл.

наделил гипотетический объект новым гипотетическим свойством, не имея на то, в отличие от предыдущих случаев, прямых экспериментальных указаний.

Действуя подобным образом, вообще говоря, нетрудно из области науки шагнуть в область фантастики, если только с самого начала не будет угадано правильное направление. А заранее это никогда не бывает известно. Именно в выборе направления при построении теории сказываются в первую очередь способности гения.

Итак, еще одно фундаментальное, не подлежащее разложению на более элементарные, свойство электромагнитного поля было обнаружено. Переменное электрическое поле порождает в пустом пространстве магнитное поле с замкнутыми силовыми линиями (вихревое поле). Причем в растущем электрическом поле силовые линии магнитного поля образуют правый винт с полем, в отличие от левого винта для поля в явлении электромагнитной индукции. Глубокий смысл этого мы потом выясним.

Доказательство реальности гипотезы Максвелла — в существовании электромагнитных волн. Ток смещения и электромагнитная индукция целиком определяют самую возможность их существования.

Электромагнитное поле

После открытия взаимосвязи электрического и магнитного полей становится очевидным важный факт: эти поля не есть нечто обособленное, независимое одно от другого. *Они — проявление единого целого, которое может быть названо электромагнитным полем.*

Пусть в некоторой области пространства имеется неоднородное электрическое поле, созданное каким-либо зарядом, покоящимся относительно Земли. Магнитного поля вокруг заряда нет. Но так будет только по отношению к Земле. (В системе отсчета, связанной с Землей, как принято говорить.) Для движущегося наблюдателя неоднородное, но не меняющееся со временем поле будет представляться уже переменным. А переменное электрическое поле рождает магнитное, и движущийся наблюдатель зарегистрирует магнитное поле наряду с электрическим.

Точно так же лежащий на земле магнит создает только магнитное поле, но движущийся относительно него наблюдатель обнаружит и электрическое поле в полном соответствии с явлением электромагнитной индукции.

Значит, утверждение — в данной точке пространства существует только электрическое (или магнитное) поле, само по себе бессмысленно. Нужно добавить: по отношению к определенной системе отсчета. Отсутствие электрического поля в системе отсчета, содержащей покоящийся магнит, совсем не означает, что электрического поля нет вообще. По отношению к любой движущейся относительно магнита системе это поле может быть обнаружено.

Подобно тому как меняется окраска окружающего нас пейзажа, если рассматривать его сквозь различные цветные стекла, меняется величина и конфигурация полей при переходе от одной системы отсчета к другой.

Подобно тому как синие предметы становятся невидимыми, если их рассматривать через красное стекло, подходящим выбором системы отсчета мы можем в ряде случаев сделать магнитное поле ненаблюдаемым.



Разница в одном, но очень важном обстоятельстве. Мы можем отбросить цветные стекла и сказать: вот истинные цвета пейзажа, вот каков он в действительности! С полным правом один из светофильтров (атмосферу) можно объявить привилегированным. Сделать же это с системой отсчета нельзя. Все они имеют совершенно одинаковые права на существование. Поэтому нет какой-то особой конфигурации полей, имеющей абсолютную значимость, независимую от системы отсчета.

8.

Бэкон о законах природы

Фундаментальные законы природы, к числу которых относятся найденные Максвеллом законы электромагнетизма, замечательны в следующем отношении: «они могут дать больше, чем заключено в том материале, из которого они получены». Именно благодаря этому возможна наука. В самом деле, если бы (перефразируя Козьму Пруткова) каждый закон, подобно колбасе, содержал бы лишь то, чем он начинен, то законов было бы столько же, сколько явлений природы, и мы вместо современной науки имели бы необозримое скопление сведений о наблюдаемых в природе процессах, но ничего нового не могли бы предсказать.

Этот факт касается самого смысла науки, и поэтому необходимость его стала понятной еще до того, как были сформулированы законы механики. Приведенное выше высказывание принадлежит английскому философу Бэкону и было сделано им до выхода в свет основного труда Ньютона «Математические начала натуральной философии».

Как передается электромагнитное взаимодействие

Среди бесчисленных следствий, вытекающих из уравнений для электромагнитного поля Максвелла, содержался результат чрезвычайной важности, предугадать который заранее было бы трудно. В них содержалась, как обнаружил сам Максвелл, *конечность*

скорости распространения электромагнитных взаимодействий.

Согласно концепции дальнодействия сила Кулона, действующая на электрический заряд, сразу же изменится, если соседний заряд сдвинуть с места. Действие передается мгновенно. С точки зрения действия на расстоянии иначе быть не может. Ведь один заряд непосредственно через пустоту «чувствует» другой.

По Максвеллу дело обстоит совершенно иначе и много сложнее. Перемещение заряда меняет электрическое поле вблизи него. Это переменное электрическое поле (ток смещения) порождает переменное магнитное поле в соседних областях пространства.

Переменное магнитное поле в свою очередь рождает переменное электрическое поле в соответствии с полевым истолкованием явления электромагнитной индукции, электрическое в свою очередь — магнитное и т. д. Причем возникающие вихри магнитного (или электрического) поля гасят поле в тех участках, где оно уже имелось, но захватывают новые области пространства. Все происходит по тем правилам определения направления полей, о которых мы уже говорили раньше. Если бы поля были направлены иначе, то это привело бы к нарушению закона сохранения энергии. Созданное в пространстве магнитное поле нарастало бы со временем, одновременно распространяясь во все стороны.

Перемещение заряда вызывает таким образом к жизни дремавшие до этого «способности» электромагнитного поля, и в результате всплеск этого поля, распространяясь, охватывает всё бо́льшие и бо́льшие области окружающего пространства, перестраивая по дороге то поле, которое существовало до смещения заряда. Наконец этот всплеск достигнет второго заряда, что и приведет к изменению действующей на него силы. Но произойдет это не в тот момент времени, когда произошло смещение первого заряда.

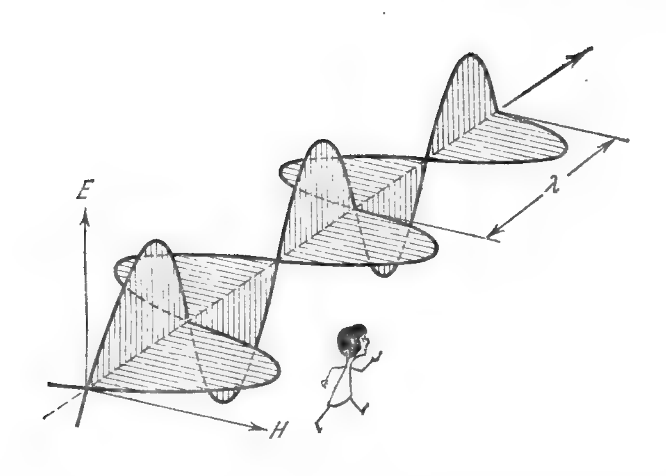
Процесс распространения электромагнитного возмущения, механизм которого был вскрыт Максвеллом, протекает с *конечной*, хотя и очень большой скоростью.

Как возникает электромагнитная волна

Имея в руках только перо и систему уравнений электромагнитного поля перед глазами, Максвелл чисто математически показал, что скорость распространения этого процесса равна скорости света в пустоте: триста тысяч километров в секунду. Вот новое фундаментальное свойство поля, которое делает его, наконец, осязаемой реальностью. Можно поставить опыт по измерению времени распространения возмущения между двумя зарядами. Практически, правда, подобный опыт вряд ли удастся осуществить, так как очень велика скорость. Но это не так уж существенно. Важно, что впервые появилась возможность доказать существование поля опытным путем. Если эта возможность есть, то рано или поздно всегда будет найден такой вариант опыта, который окажется осуществимым. Так и произошло в действительности, когда Герцу удалось получить электромагнитные волны.

Представьте себе, что электрический заряд не просто сместился из одной точки в другую, а приведен в быстрые колебания вдоль некоторой прямой, так что он движется подобно грузу, подвешенному на пружинке, но только много быстрее. Тогда электрическое поле в непосредственной близости от заряда начнет периодически изменяться. Период этих изменений, очевидно, будет равен периоду колебаний заряда. Электрическое поле будет порождать периодически меняющееся магнитное поле, а последнее в свою очередь вызывает появление переменного электрического поля, уже на большем расстоянии от заряда, и т. д.

В окружающем заряд пространстве, захватывая всё бóльшие и бóльшие области, возникает система периодически изменяющихся электрических и магнитных полей («моментальный снимок» такой системы, по-видимому, многим хорошо известен), и этот процесс распространяется со скоростью света. Образуется то, что мы называем электромагнитной волной, бегущей во все стороны от колеблющегося заряда. В каждой точке пространства электрические и магнитные поля меняются во времени периодически, но, так как чем дальше расположена точка от заряда, тем



позднее достигнут ее колебания полей, на разных расстояниях от заряда колебания не происходят синхронно.

Максвелл был глубоко убежден в реальности электромагнитных волн, но дожить до их обнаружения ему не было суждено. Умер он сравнительно молодым, за 10 лет до того, как Герц впервые экспериментально доказал существование электромагнитных волн.

Взаимодействие посредством электромагнитных волн

Посредством электромагнитных волн осуществляется совершенно новый тип взаимодействия между электрическими зарядами. Излучаются волны колеблющимися электрическими зарядами, следовательно, зарядами, скорость движения которых меняется со временем,— зарядами, движущимися с *ускорением*. *Ускорение* — главное условие порождения электромагнитных волн. Электромагнитное поле излучается не только при колебаниях заряда, но и при любом резком изменении его скорости.

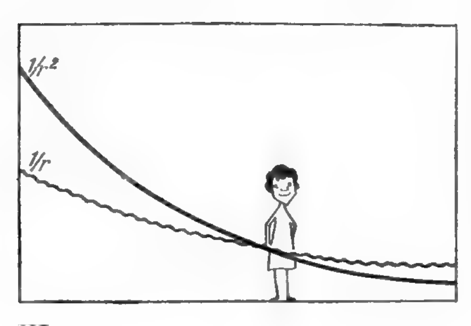
Итак, *силы взаимодействия, осуществляемые электромагнитным полем, зависят не только от расстояния между частицами и их скоростей, но и от ускорений*! Однако при этом от ускорения зависит только величина поля. Сила же, действующая на заряд со стороны электрического поля электромагнитной волны, по-прежнему зависит только от напряженности

поля, а со стороны магнитного — еще от скорости движения заряда.

С чем большей частотой колеблется заряд, тем большее ускорение он имеет и тем соответственно более интенсивны излучаемые им волны. При увеличении частоты колебаний всего лишь в два раза излучаемая энергия возрастает в 16 раз! Поэтому в антеннах радиостанций возбуждаются колебания с частотой в сотни миллионов колебаний в секунду.

Самым важным фактом взаимодействия посредством электромагнитных волн, определяющим все его значение, является медленность убывания напряженностей полей в волне с расстоянием от источника. Как вы помните, электростатические силы и силы взаимодействия токов обратно пропорциональны квадрату расстояния и при этом считаются дальнодействующими. Убывание же с расстоянием полей в электромагнитной волне происходит обратно пропорционально *самому расстоянию*! Это крайне медленное убывание. Все другие силы уменьшаются с расстоянием гораздо быстрее. Здесь же, как показывают вычисления, за счет последовательного возбуждения полей друг другом они оказываются способными уходить от источника очень далеко. Вот почему поля даже сравнительно маломощной радиостанции могут быть обнаружены на расстояниях в тысячи километров, в то время как статические поля на таких расстояних уже никак не сказываются.

Здесь мы встречаемся с любопытным фактом. Поле, создаваемое зарядом на малых от него расстояниях, — это, в основном, кулоновское поле (правда, несколько модифицированное движением источника) со сравнительно малыми добавками вихревых электрических и магнитных полей. Но стоит нам отойти подальше — и эти добавки окажутся на первом плане и затмят быстро спадающие с расстоянием кулоновские поля.



Нечто похожее происходит, если угодно, и с людьми. Разве редко случалось, что современники, смотревшие, так сказать, с малого расстояния, не понимали, за единичными исключениями, тех людей, истинные масштабы величия которых стали явственными только благодаря исторической перспективе? Кеплер, поздний Рембрандт, Лобачевский... разве перечислишь?

Но вернемся к электромагнитным волнам.

По той же причине, о которой мы говорили выше, мы видим (ведь свет — тоже электромагнитная волна) звездные скопления, удаленные от нас на невообразимые расстояния, которые свет преодолевает только за миллиарды лет!

Нельзя не упомянуть и еще об одной стороне процесса излучения. Если частица излучает, то расходящиеся электромагнитные волны уносят с собой энергию. Излучающая частица теряет энергию и, следовательно, должна испытывать некоторое торможение. На нее действует нечто подобное силе трения. Но что же это за сила? Со стороны чего она действует?

Нам хорошо известно, что на заряженную частицу действует сила со стороны электрического и магнитного полей. Пока мы имели в виду только внешние (т. е. создаваемые окружающими частицу заряженными телами) поля. Но ведь есть еще и поля собственные, создаваемые самой частицей. Не оказывают ли они воздействия на порождающий их источник? Легко сообразить, что никаких сил самовоздействия нет, если источник покоится. Ведь иначе произошло бы совершенно невероятное: самоускорение частицы, предоставленной самой себе. Положение не меняется и при равномерном и прямолинейном движении источника (в чем легко убедиться, вспомнив, что покой есть просто частный случай равномерного прямолинейного движения). В этих простейших случаях полевой шлейф несется вместе с частицей, не отрываясь и не деформируясь.

Совсем иной становится картина, если, например, резко подтолкнуть источник. Будь скорость распространения электромагнитных сигналов бесконечно большой, вслед за совершившей «рывок» частицей метнулось бы и все создаваемое ею поле, а, следова-

тельно, сила самовоздействия как была, так и осталась бы нулевой. Но этого не происходит. Частица успевает выскочить из положения равновесия в собственном поле, вследствие чего должна появляться сила, стремящаяся вернуть ее в это положение, — тормозящая сила. Частица как бы увязает в собственном поле. Недаром физики говорят, что появляется «радиационное трение». Не будет ошибкой сказать, что энергия, теряемая излучающей частицей, равна работе силы радиационного трения, т. е. силы, с которой действует на источник создаваемое им поле.

Но у самовоздействия есть и еще одна интересная черта. Мы сказали, что сила самовоздействия покоящейся (или равномерно и прямолинейно движущейся) частицы равна нулю. Но из этого вовсе не следует, что равна нулю и энергия. Полевой шлейф имеет энергию, он имеет массу, он, следовательно, вносит свой вклад в инерцию частицы.

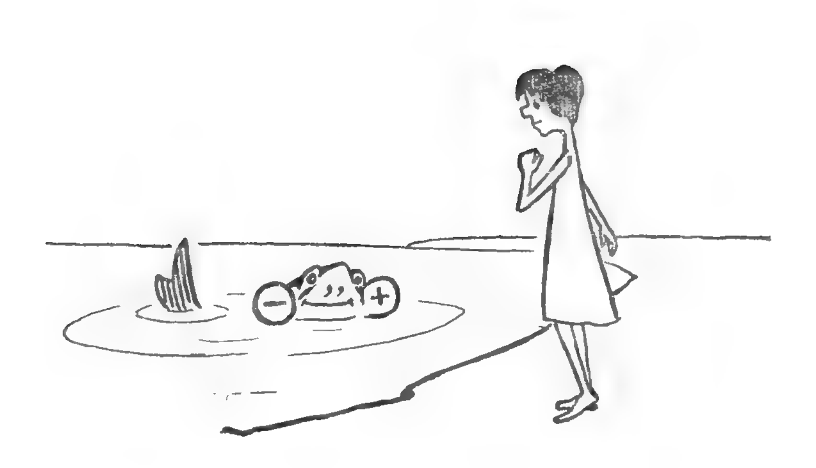
Если бы электрон вдруг потерял по какой-то таинственной причине свой заряд, в то же мгновение уменьшилась бы его масса. На какую долю? Вот этого мы пока не знаем. Да это и не удивительно. Ведь здесь мы касаемся таких сторон взаимодействия между частицами и создаваемым ими полем, разобраться в которых можно лишь после основательного углубления наших знаний о том, что часто называют структурой элементарных частиц. А это пока еще область науки завтрашнего дня.

Глава четвертая

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИЛЫ В ДЕЙСТВИИ

И всюду явный — ты, и всюду
тайный — ты!
И на что бы ни упал мой взор —
это все ты.

Джами, «Книга Мудрости»



1. *Как проявляются электромагнитные силы?*
2. *Силы, строение вещества, уравнения движения.*
3. *Электромагнитные силы в электрически нейтральных телах.*
4. *Свободные заряды и токи в природе.*
5. *Электромагнитные волны в природе.*
6. *Почему электромагнитным взаимодействиям отведено самое большое место в книге?*
7. *Вставка, у которой все права быть главой.*

I.

От книги на столе до радиоизлучения Галактик

В этой главе не вводится никаких новых сил: в ней рассказывается о тех же электромагнитных взаимодействиях, которым посвящена предыдущая глава. Но там внимание было сосредоточено на принципиальных вопросах, касающихся самой природы электромагнитных сил. Теперь же мы попытаемся рассказать, как немногочисленные, в сущности, «основные законы бытия» электромагнитных полей позволяют единым образом разобраться в широчайшем круге явлений — от самых обыденных (почему книга не проваливается сквозь стол!) до таких, которые с полным правом называют величественными (радиоизлучение Галактик).

Итак, мы продолжаем рассказ об электромагнитных силах. Продолжаем, но в то же время начинаем новый рассказ.

Как проявляются электромагнитные силы

Может быть, вы помните, как в пьесе Горького «Варвары» на вопрос Дробязгина: «А добродетели тайные бывают?» — стареющий циник Цыганов отвечает: «Они, должно быть, всегда таковы... Я не видел явных добродетелей».

С гораздо большим основанием подобного рода ответ мог бы быть дан на вопрос: «А бывают ли в природе неявные (скрытые) проявления электромагнитных сил?» Здесь со спокойной совестью можно утверждать: почти всегда мы имеем дело с неявными проявлениями этих сил, хотя, правда, каждый из нас может сказать, что он встречался и с явными проявлениями.

Положительные и отрицательные заряды, точнее, положительно и отрицательно заряженные частицы за редкими исключениями оказываются *связанными* друг с другом, образуя нейтральные тела. Причем связь эта обычно осуществляется в самых глубинах материи — в атомах. Лишь здесь непосредственное взаимодействие с помощью кулоновских сил является

определяющим. Но это взаимодействие запрятано настолько глубоко, что обнаружить его можно только с помощью сложных физических приборов. В остальных же случаях мы преимущественно встречаемся с электромагнитными взаимодействиями между нейтральными системами (атомами и молекулами). Это взаимодействие *связанных* зарядов, при котором электромагнитные силы уже не выступают в такой простой форме, как в законах Кулона и Ампера. Поэтому такие проявления электромагнитных сил мы будем называть неявными. Заряженные частицы в *свободном* состоянии встречаются значительно реже, чем в *связанном* *). Случаи, когда в природе на наших, так сказать, глазах заряженные тела взаимодействовали бы по Кулону, а токи — по Амперу, сравнительно редки. Не случайно ведь на протяжении многих веков уже после возникновения цивилизации люди жили в окружении сил электромагнитной природы, нимало не подозревая, что упругость, трение и т. д. — это разные выражения одних и тех же в своей основе сил.

Когда электромагнитные силы становятся короткодействующими

Электромагнитные силы между связанными в нейтральные системы зарядами оказываются *короткодействующими*. Они убывают с расстоянием несравненно быстрее, чем кулоновские или ньютоновские. Поэтому эти силы становятся заметными только на очень малых расстояниях, при непосредственном, как принято говорить, контакте тел. Здесь оказывается замаскированным тот факт, что в действительности взаимодействие между телами всегда осуществляется на расстоянии посредством электромагнитного поля и никакого прямого контакта по существу нет.

Открытые давно, но наблюдаемые только в особых условиях, явные взаимодействия казались курьезом, не связанным тесно с обыденными явлениями. С полной очевидностью эти силы действовали без всякого контакта через пустоту.

*) Кстати, термины *свободные* и *связанные* заряды являются вполне официальными.

Противоположно заряженные частицы сами собой образуют связанные состояния, прекращая при этом оказывать заметное влияние даже на своих близких соседей. Только ближайшие соседи оказываются удостоенными их внимания. Одновременно заряды в таких состояниях теряют способность перемещаться в электромагнитном поле независимо друг от друга, не могут образовывать электрический ток проводимости.



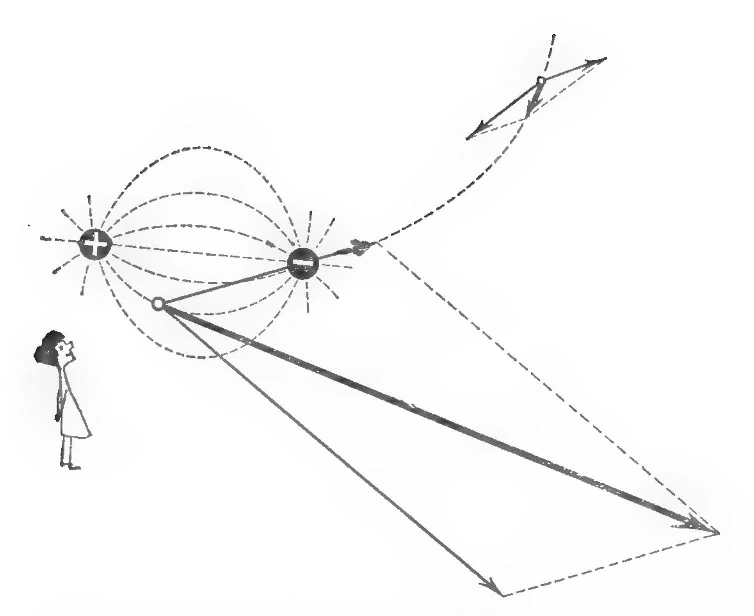
Аналогичного эффекта добивалось правосудие отдаленных времен, сковывая преступников попарно цепью. Они после этого делались безопасными для окружающих и не могли убежать. Практика такого рода была обычной:

«Поймали нас — и кузнецы
Нас друг ко другу приковали»,—

рассказывает разбойник в одной из поэм Пушкина.

В атоме такой цепью, приковывающей электроны к ядру, служит электрическое поле.

Наше сравнение не поясняет, конечно, почему нейтральные тела не обнаруживают в обычном состоянии электромагнитных взаимодействий на сколько-нибудь значительном расстоянии. Дело здесь само по себе несложное. Вот, например, простейшая нейтральная система — электрический диполь: два одинаковых заряда противоположных знаков на небольшом расстоянии друг от друга. В точке, удаленной от диполя на расстояние, много большее длины диполя, электрические поля положительного и отри-



цательного зарядов почти одинаковы, а направлены чуть ли не в противоположные стороны. Поэтому полное поле (сумма двух полей) весьма мало. У диполя электрическое поле убывает обратно пропорционально кубу расстояния, а у более сложных нейтральных систем еще быстрее.

Говоря иными словами, почти все электрическое поле сосредоточено между зарядами: силовые линии перекинуты от одного заряда к другому и как бы стягивают их вместе. На большом расстоянии от диполя электрического поля, можно считать, нет *). Все поле оказывается сосредоточенным внутри нейтрального тела и на самой его периферии.

Не всегда хорошо начинать с простого

В нашем рассказе о действии электромагнитных сил в природе мы будем почти всегда иметь дело с неявными их проявлениями. Такие случаи, как молния или разряд электрического ската, огни святого Эльма и т. д.,— это инте-

*) Это справедливо для статического диполя, заряды которого не смещаются по отношению друг к другу. При быстром колебании зарядов диполь будет излучать электромагнитные волны.

ресные, а зачастую и грозные явления, но все они не идут по своей значимости ни в какое сравнение с такими явлениями, как упругость, трение и т. д.

Можно было бы начать рассказ со случаев, когда мы имеем дело со *свободными* электрическими зарядами, осевшими на телах или перемещающимися между ними. Но свободное электричество возникает из электричества связанного и не существует в природе долго в этом состоянии, если не касаться состояния вещества при очень высоких температурах *). Поэтому, чтобы объяснить возникновение такого явления, как молния, нужно отправляться от связанных зарядов в нейтральных телах. Начать придется всетаки с этого, хотя неявные проявления электромагнитных сил и сложнее, чем явные. Иначе удастся только понять, как *протекают* отдельные простые электромагнитные процессы, но как и почему они *возникают*, почему они не длятся бесконечно долго, останется неясным.

Может быть обо всем этом и не стоило говорить столь подробно, если бы не одно обстоятельство. В электротехнике, откуда в основном черпает представления об электромагнитных силах современный человек, используются преимущественно свободные заряды, причем заряды в движении — электрический ток. Электростатические силы человеку не удалось приручить до сих пор, хотя они несравненно мощнее магнитных. Из-за этого невольно возникают часто превратные представления о значении различного рода сил в окружающем нас мире. Природа гораздо экономнее в использовании электромагнитных сил, ибо во всех почти случаях «предпочла» силы электрические (кулоновские) как более мощные, сведя роль магнитных сил на Земле до минимума. Природа, можно сказать, оказалась более изощренным «инженером», чем люди. О том, как она это делает, мы и постараемся здесь рассказать. Технических применений законов электродинамики мы постараемся не касаться: наша задача — в первую очередь рассказать о *силах в природе*.

*) При очень высоких температурах вещество переходит в состояние плазмы, с полным правом называемое учеными четвертым состоянием вещества наряду с твердым, жидким и газообразным.

2.

Что надо знать для объяснения упругости

Вернемся к нашему столу, покинутому на стр. 97. Как же объяснить, почему при прогибе стола возникает сила, стремящаяся вернуть его в начальное состояние? Как было объявлено ранее, сила эта имеет электромагнитную природу. Теперь мы знаем основные законы электромагнетизма и, может показаться, уже готовы немедленно дать объяснение происхождения упругой силы.

Но попробуйте-ка это сделать! Конечно, никакой разумной теории сил упругости вы не придумаете. И не только потому, что у вас нет опыта и не ясно, как приступать к делу. Знания одной только природы электромагнитных сил еще *недостаточно*. «Теоретизировать же, не имея данных, опасно. Незаметно для себя человек начинает подтасовывать факты, чтобы пригнать их к своей теории, вместо того чтобы обосновывать теорию фактами». Эти слова принадлежат «гению с Бейкер-стрит», мистеру Шерлоку Холмсу. Они справедливы в равной мере как при раскрытии преступлений, так и при исследовании природы.



Что же еще нам нужно знать, чтобы составить себе ясную картину возникновения упругих сил?

Законы электромагнитных взаимодействий позволяют нам сказать, какие силы возникают между *заряженными* частицами на *определенном* расстоянии друг от друга, если они движутся с известными *скоростями*. Чтобы найти величину этих сил, нужно, следовательно, кроме знания фундаментальных законов взаимодействий, еще знать, каковы *свойства частиц*, слагающих вещество, как они *расположены* относительно друг друга и как они *движутся*. Без этого мы не сможем объяснить происхождения ни сил упругости, ни сил трения, ни любых других сил электромагнитной природы. Не сможем понять также, почему твердые тела стремятся сохранять свою форму, а жидкие — объем.

Три слона, на которых покоится физика

Неожиданного здесь ничего нет. Упругие свойства, например, резины очень мало напоминают свойства деревянной палки, хотя в том и другом случае упругость имеет электромагнитную природу. Только различием в строении вещества мы можем объяснить этот и подобные ему факты. О строении вещества мы уже



немного говорили, когда речь шла о явных и неявных проявлениях электромагнитных сил. Значительно больше будет сказано в дальнейшем.

Пусть нам известно строение вещества. Достаточно ли этого для объяснения упругих и других сил электромагнитного происхождения, позволяет ли это понять устойчивость кусков вещества? При сжатии или растяжении меняются размеры тел, а значит и расстояния между заряженными частицами, слагающими вещество. Происходит изменение состояния движения частиц, меняются их скорости, они перемещаются. Чтобы узнать, как будет перемещаться частица под действием определенной силы, а это необходимо в теории упругости, надо знать еще законы *движения*: надо знать, как меняется движение под влиянием силы. Для объяснения устойчивости кусков вещества знание уравнений движения также необходимо, поскольку вещество построено из движущихся, взаимодействующих частиц, и только вследствие этого движения оказывается возможной устойчивость как самого атома, так и образований из громадного количества атомов — макроскопических тел.

С классическими уравнениями движения мы знакомы. Это законы Ньютона, о которых шла речь выше. Именно уравнения движения вместе с законом всемирного тяготения позволили объяснить движение планет солнечной системы, а в настоящее время позволяют с громадной точностью рассчитывать траектории космических кораблей. Знания одних гравитационных сил для этого совершенно недостаточно.

Итак, наряду с *фундаментальными законами взаимодействий* надо знать еще *строение вещества* и *уравнения движения*. И это нужно, кстати сказать, для *объяснения любого физического явления*. Строение вещества, силы и уравнения движения — вот три «слона», на которых покоится вся физика.

Строение вещества

Что такое силы и уравнения движения — мы уже выяснили. Что касается представлений о строении вещества, то они в первую очередь включают знание свойств элементарных частиц. Сведения об основных устойчивых комбина-

циях, которые эти частицы образуют (атомные ядра и атомы), также могут быть отнесены к строению вещества. Знание строения вещества включает в себя, наконец, знание об упорядоченных образованиях из атомов — молекулах и кристаллах. Последнее как раз и нужно для объяснения сил упругости.

«Нельзя обьять необьятное»

Вы, наверное, уже заметили, в какое затруднительное положение мы попали: собирались рассказать только о силах, а выяснилось, что надо говорить и о строении вещества, и об уравнениях движения. А ведь это вся физика!

Трудности не бросались в глаза, когда речь шла о действиях гравитационных сил. Силы эти значительны лишь для больших тел, внутреннее строение которых никак не сказывается на величине силы (существенна только их масса). Законы движения просты и наглядны — уравнения Ньютона.

С электромагнитными силами внутри нейтральных тел дело обстоит гораздо сложнее. Здесь требуются сведения о свойствах элементарных частиц, о строении атомов, молекул и кристаллов. Самое же главное в том, что движение атомных частиц, взаимодействие между которыми в конечном счете обусловливает устойчивость и упругие свойства вещества, подчинено неизмеримо более сложным законам движения, чем классические. Это законы квантовой механики, рассказ о которой сам по себе требует книги.

Мы неукоснительно будем придерживаться нашей цели — *сил* в природе, и поэтому будем стремиться ограничиться самыми минимальными сведениями из других областей физики, без которых уже совсем нельзя обойтись. В картине, которую мы нарисуем, будет только упрощенная схема поведения частиц, истинное понимание которого возможно лишь при более или менее глубоком знакомстве с квантовой механикой. Иначе легко можно оказаться в положении человека, собравшегося позабавить слушателей рассказом об одном эпизоде из своей жизни, а вместо этого принявшегося подробно излагать всю свою биографию из боязни, что его не поймут, как следует.

Единство природы

Надо сказать, что слоны, на которых покоится вся физика, отнюдь не являются существами вполне самостоятельными. Особенности одного из них предопределяют в той или иной мере характер других. Только в теории элементарных частиц мы не обнаруживаем пока еще органической связи между свойствами этих частиц, силами и уравнениями движения. Еще не ясно, почему в мире существует определенное количество элементарных частиц и почему они имеют именно те свойства, которые обнаруживает эксперимент. Проблема строения элементарных частиц в этом смысле не решена. Однако уже сейчас имеется определенная надежда решить эту проблему, хотя бы отчасти, в недалеком будущем. Связи, о которых идет речь, начинают намечаться, и все крепче становится уверенность, что только недостатки нашего «научного зрения» создают иллюзию трех независимых столпов теории. Скорее всего все здание науки должно покоиться, так сказать, на одной черепахе. То, что мы принимаем за «самостоятельных слонов», на самом деле лишь своеобразные сегменты панциря этой неведомой нам пока черепахи.

Строение атомов, молекул и макроскопических кусков вещества вполне определяется известными нам силами взаимодействия между частицами, слагающими эти объекты, и законами их движения. Надо, конечно, знать еще, какие же частицы слагают атомы и вещество, и здесь нужные сведения может дать только опыт. Дальше строение атома, молекулы и т. д. в принципе можно получить «на кончике пера». Правда, во многих случаях только в принципе. Возникающие трудности столь велики, особенно когда система состоит из большого числа частиц, что основные сведения приходится добывать опытным путем.

Как правило, исследователи раньше проникают в тайны строения веществ с помощью прямых опытов, чем получают возможность исследовать его на основании одних лишь фундаментальных законов взаимодействий и уравнений движения.

Ведь последние часто удается сформулировать, когда ставят задачу объяснения известных фактов

строения вещества. Сейчас, например, мы знаем, из чего состоят атомные ядра всех элементов, но не имеем законченной теории ядерных сил и потому не можем предсказать теоретически с полной определенностью, насколько устойчива та или иная комбинация протонов и нейтронов.

Самый простой путь

Вполне понятно, что гораздо проще *объяснить* известными силами и законами движения экспериментально *установленные факты строения вещества*, чем пытаться, пользуясь этими законами, *найти*, как *должно быть* построено вещество. Точно так же гораздо проще разобраться в конструкции уже готового автомобиля и понять, как и почему он работает, чем сконструировать его, располагая лишь набором материалов и инженерной наукой. Недаром ведь существует патентное законодательство, защищающее права изобретателей. Правда, здесь есть существенное различие. Набор материалов, которыми располагает конструктор, весьма неоднороден. Различными могут быть и технические требования к автомобилям. В природе это не так. Атомы и молекулы конструируются из совершенно стандартного набора «деталей»: я́дра — из протонов и нейтронов, а оболочки — из электронов. Кроме того, законы природы (законы квантовой механики), абсолютно однозначно определяют «выход готовой продукции» — совокупность возможных в природе атомов и не слишком сложных молекул. Мы лишены возможности варьировать свойства атомов, как это делается с моделями автолюбителей. Можно лишь получать сложные молекулы и вещества с определенными свойствами (например, полимеры), комбинируя исходные материалы и развивая технологию их обработки.

Мы пойдем в дальнейшем по наиболее простому пути. Основные данные о строении атомов, молекул и макроскопических тел будем считать установленными экспериментально, ни слова не говоря, как это было сделано. Главная цель — рассказать, как действием электромагнитных сил можно объяснить это строение. После этого можно перейти к тому, что происходит с веществом при внешних воздействиях. Какие силы в нем появляются и почему?

3.

Атом

«Дайте мне запас электронов, и я немедленно построю вам с помощью кулоновских сил атом»,— могло бы сказать с полным правом атомное ядро,... если бы умело разговаривать. Ведь именно эти силы удерживают электроны у положительно заряженного ядра. Если оголить ядро, сорвав прикрывающие его электроны, то электрическое поле ядра немедленно начнет захватывать пролетающие возле него свободные электроны и будет их захватывать до тех пор, пока число электронов не станет равным заряду ядра. Как только система электрон — ядро становится нейтральной, построение атома закончено.

Основы строения атома сейчас стали азбучной истиной. В центре атома расположено ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома, а вокруг ядра движутся электроны.

Атом мал и крайне пуст внутри, если не считать заполняющего его электрического поля. Гораздо более пуст, чем наша солнечная система, размеры которой в сотни раз превосходят размеры самого Солнца и в десятки тысяч раз размеры планет. Если бы атом внезапно вырос до размеров земной орбиты, то ядро оказалось бы в тысячу раз меньше Солнца. А ведь уменьшись наше Солнце в тысячу раз, мы видели бы на небе светящуюся точку вместо сверкающего диска.

Часто говорят и сейчас, а раньше были в этом твердо уверены, что электроны движутся вокруг ядра по определенным орбитам, подобным орбитам планет солнечной системы. Ведь электростатические силы вполне аналогичны по своему характеру силам всемирного тяготения. Разница лишь в том, что сила взаимодействия «планет» атомной системы (электронов) друг с другом не очень значительно отличается от силы взаимодействия их с ядром, в то время как в солнечной системе только притяжение к Солнцу велико. Взаимодействие планет вносит малые поправки. Заряд самого тяжелого ядра не превышает

заряда электрона более чем в 100 раз. Масса же Солнца в миллион раз больше массы планет. Наконец, электроны отталкивают друг друга, а планеты притягивают.

Но не в этом заключено то колоссальное различие, которое имеется в строении атома и солнечной системы.

Нераскрытая пока до конца тайна происхождения солнечной системы хранит в себе причины определенных размеров орбит планет солнечной системы. Мы легко можем допустить, что они могли бы быть иными. Да что говорить, ведь сейчас люди сами создают маленькие планеты, и их орбиты мы можем выбирать произвольно, придавая ракете определенную скорость.

Совершенно не то в атоме. Его свойства, а следовательно и строение, совершенно не зависят от происхождения. Все атомы данного химического элемента тождественны, независимо от того, существуют ли они с незапамятных времен или же возникли буквально на наших глазах путем захвата электронов только что изготовленным ядром. Заставить электрон двигаться в атоме так, как мы хотим, невозможно.

Все дело в том, что ядро строит атом посредством своего электрического поля *не по правилам механики Ньютона, не по правилам электродинамики Максвелла*. Построить атом, который бы жил по этим законам, вообще невозможно.

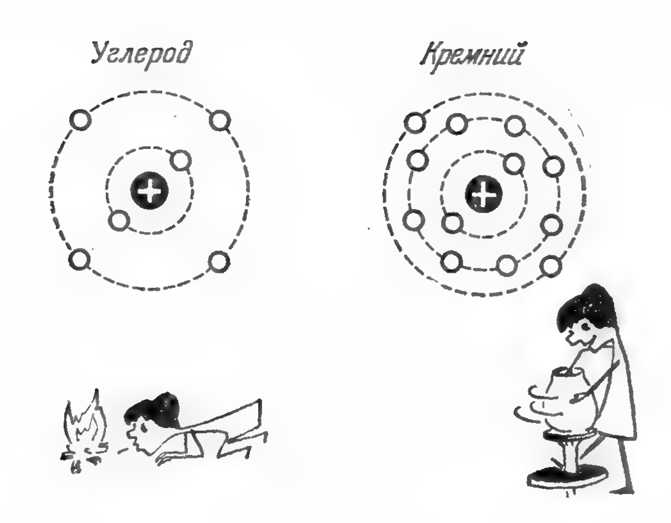
Электроны в атоме, разумеется, не могут двигаться по прямой. Они двигаются с ускорением и, следовательно, должны излучать электромагнитные волны. Излучение сопровождается потерей энергии, поэтому электроны неизбежно должны упасть на ядро, подобно тому как спутник, в верхних слоях атмосферы теряя энергию вследствие сопротивления воздуха, рано или поздно падает на Землю. Разница в том, что спутник может кружиться годами, а электрон, если следовать классической теории, не более стомиллионной доли секунды. Кратковременная вспышка света засвидетельствовала бы гибель атома. Электромагнитное поле классической физики должно было бы губить атом, хотя оно же и создает его. Совсем как Тарас Бульба своего сына: «Я тебя породил, я тебя и убью».

В действительности же ничего подобного не происходит. Если обращаться с атомом не слишком грубо, то он может существовать сколь угодно долго. Природа поступила очень мудро, подчинив движение микрочастиц квантовым законам. Выполняя квантовые правила поведения, атом избегает гибели, подобно тому как водители машин избегают несчастных случаев, выполняя правила уличного движения. Но только квантовые правила внутриатомного движения — это закон природы, нарушить который ни электрон, ни что другое в мире не может. Суть этих правил в том, что энергия электрона в атоме может иметь только определенный ряд прерывных значений, не может изменяться постепенно, и электрон не может непрерывно излучать. Всегда имеется минимальное значение энергии, которую атом не теряет ни при каких условиях, если только ему удается сохранить свою электронную оболочку.

Об излучении речь пойдет впереди. Для понимания дальнейшего важно, что движение электрона в атоме почти ничего общего не имеет с движением планет по орбитам. Если бы атом водорода в наинизшем энергетическом состоянии (простейшая система) можно было бы сфотографировать с большой выдержкой, то мы увидели бы облако с максимальной плотностью на определенном расстоянии от ядра. Это расстояние можно принять за грубое подобие радиуса орбиты. Фотография атома совсем не походила бы на привычный рисунок солнечной системы, а скорее напоминала бы расплывчатое пятно, полученное при фотографировании ночной бабочки, беспорядочно толкущейся вокруг фонаря *).

О строении сложных атомов нам нужно твердо запомнить следующее. Электроны в атомах располагаются слоями или, как говорят, оболочками. Число вакантных мест в каждом слое строго ограничено. В ближайшей к ядру внутренней оболочке их может быть только два, в следующей уже 8, и т. д. Чем дальше от ядра, тем больше дозволенное количество

*) Здесь нужно иметь в виду сходство картин только в среднем за время выдержки. Движение электрона никак нельзя отождествлять с порханием бабочки, равно как и с движением любого другого макроскопического тела.



электронов, но оно всегда остается ограниченным. Не электрические силы диктуют это, а жесткие квантовомеханические правила. Это — требование принципа Паули, суть которого в том, что нельзя электронам, тождественным по своим свойствам, быть еще тождественными по состоянию. «Хоть чем-нибудь, но отличайтесь друг от друга»! — вот приказ природы.

Увеличение числа электронов в атоме и образование новых слоев, заполненных электронами, не сопровождается расширением атома. Увеличение положительного заряда атомного ядра вызывает сжатие внутренних оболочек. Таким образом, размеры всех атомов, определяемые радиусами внешних слоев, оказываются примерно одинаковыми, а внутренние электроны все теснее и теснее примыкают к ядру по мере увеличения его заряда.

Эти закономерности в строении атомов проявляются в полной мере, когда атомы встречаются друг с другом. При встрече они соприкасаются своими внешними оболочками, и то, что происходит в глубинах атома, оказывается не таким уж существенным. Главное — сколько электронов на периферии атома. Их число целиком, практически, определяет те «намерения», которые обнаруживают атомы при сближении: сцепиться ли им друг с другом или разойтись

восвояси. Можно смело утверждать, что встречают друг друга атомы исключительно по одежке, хотя сама «одежка» определяется сердцевиной атома — ядром.

Число внешних электронов меняется периодически по мере увеличения заряда ядра. После застройки одной оболочки начинается строительство новой, уже дальше от ядра. В этом ключ к разгадке физического смысла периодической системы элементов Менделеева. Ведь химические свойства атома определяются числом внешних, наименее связанных с ядром электронов.

Нетрудно понять, что чем меньше электронов содержит внешняя оболочка, тем слабее они связаны с ядром. Внутренние электроны вместе с ядром можно, грубо говоря, рассматривать как положительный ион. Если внешняя оболочка имеет лишь один электрон (типичные металлы: литий, натрий и др.), то он притягивается зарядом иона, равным единице в атомной системе единиц.

При двух электронах в наружном слое (бериллий, кальций и т. д.) каждый из них притягивается к центру с силой в два раза большей, ибо электрический заряд остальной части атома равен двум, и т. д. С увеличением числа внешних электронов увеличивается заряд положительного иона, сила притяжения электронов возрастает, радиус орбит уменьшается и прочность связи растет. Связь наиболее прочна, когда внешняя оболочка целиком заполнена. Это имеет место у инертных газов: гелия, неона, аргона и других. Число электронов во внешней оболочке равно двум у гелия и восьми у всех остальных.

Атомное ядро

В атоме электрические силы являются главными. Внутри ядра им принадлежит выдающаяся, но уже не основная роль. Заряженные положительно протоны ядра расположены чрезвычайно близко друг к другу и поэтому не могут не взаимодействовать. С громадной силой они отталкиваются друг от друга, и не будь более мощных ядерных сил, ядро не могло бы существовать. Со скоростями, близкими к скорости света, протоны разлетелись бы в разные стороны.

Мощные кулоновские силы отталкивания делают ядро подобным сжатой пружине, стремящейся распрямиться. У атомов тяжелых элементов протонов так много (у урана их 92), что ядра становятся неустойчивыми. Ядерные силы притяжения, которые в легких ядрах совершенно подавляют электрическое отталкивание, в уране с трудом противостоят ему. Достаточно незначительного толчка (попадания нейтрона) и ядро разваливается на две половины, разлетающиеся под действием сил отталкивания с огромными скоростями. Именно за счет работы *электрических сил* выделяется энергия в атомном реакторе и при взрыве атомной бомбы. Так называемая ядерная энергия, выделяемая здесь, это в сущности энергия электромагнитная.

Два типа сил между атомами

Доказать существование значительных сил между нейтральными атомами (или молекулами) совсем не сложно. Попробуйте-ка сломать толстую палку! А ведь она состоит в конечном счете из атомов. Два типа электрических сил совершенно разной природы могут действовать между атомами. Один из них имеет простой аналог во взаимодействии больших тел и «вполне добропорядочен», ибо является классическим в своей основе.

Другой тип — это квантовомеханические силы, часто называемые обменными. Их можно рассчитать с помощью квантовой механики, но если попытаться создать наглядную картину возникновения этих сил, то с неизбежностью эта картина окажется неполной. Происходящее в атоме нельзя целиком описать языком классической физики, т. е. единственно наглядным научным языком для людей, весь повседневный опыт которых есть опыт созерцания явлений, подчиняющихся классической физике.

На больших расстояниях между атомами действуют только классические силы. В этом случае взаимодействие атомов проявляет, несомненно, если не полное, то достаточно заметное пренебрежение к деталям строения самих атомов. Как взаимодействие отдельных атомов, так и взаимодействие групп атомов, объединенных в молекулы, подчинено одному закону. Именно поэтому данный тип сил носит назва-

ние *молекулярных*. Ведь атом можно считать частным случаем молекулы, ее простейшей формой. Иногда эти силы называют силами Ван-дер-Ваальса по имени голландского ученого, который впервые ввел их в теорию газов и применил для объяснения перехода газов в жидкое состояние.

На значительных расстояниях ни атомы, ни молекулы не отталкиваются. Удаленные соседи всегда стремятся друг к другу. Молекулярные силы на большом расстоянии — это силы притяжения.

Обменные силы возникают при сближении атомов, когда их внешние оболочки начинают соприкасаться. Здесь уже полностью проявляется индивидуальность встретившейся пары. Атомы либо образуются устойчивую систему — молекулу, либо же энергично отталкиваются.

Объединение атомов в молекулы — это уже химия. Поэтому квантовомеханические силы сцепления часто называют химическими.

Если попытаться сблизить атомы на расстояние, меньшее суммы их радиусов, то между ними обязательно возникнут силы отталкивания. Вогнать один атом внутрь другого не удастся.

Надо подчеркнуть, что в основе как молекулярных сил, так и химических лежит *элетростатическое* взаимодействие. Магнитные силы сколько-нибудь существенной роли не играют.

Сейчас мы познакомимся с обоими типами сил несколько более подробно.

Молекулярные силы

Как возникает молекулярное притяжение между электрически нейтральными системами? Сначала постараемся понять, почему клочки бумаги или другие легкие предметы притягиваются к наэлектризованному телу.

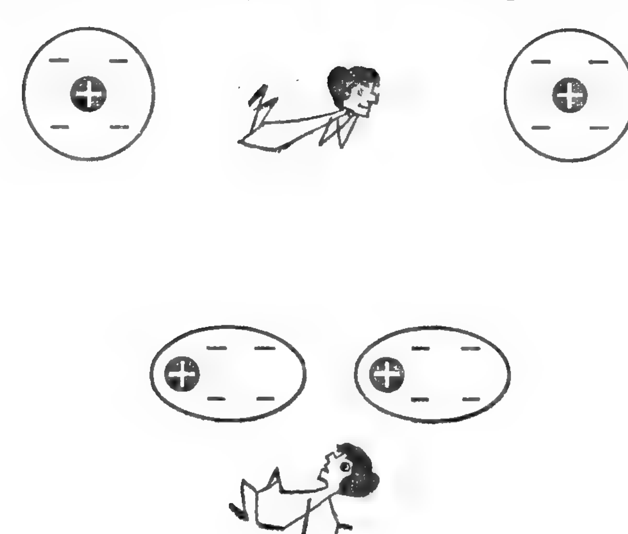
Вот положительно заряженный стержень приближается к бумажной полоске. Заряженные частицы атомов бумаги не могут остаться к этому равнодушными. Электроны смещаются навстречу положительному заряду, а ядра отступают немного назад. Происходит то, что физики называют поляризацией. Отрицательный заряд оказывается ближе к наэлектризованному телу, чем положительный, и сила

притяжения получает перевес над силой отталкивания.

Если вместо бумажного клочка была бы одна только молекула, с ней произошло бы то же самое. Электрическое поле подобно ветру сдувает легкие электроны немного в сторону от ядер, и молекула превращается в электрический диполь, в котором заряды противоположных знаков пространственно разделены.

У многих веществ, например у воды, молекулы при своем рождении сразу же оказываются подобными электрическому диполю. Такие молекулы своим электрическим полем вызывают поляризацию соседей и появление сил притяжения.

Лишь в том случае, когда электронное облако каждого из атомов имеет полную шаровую симметрию, между ними не возникнут силы притяжения. Однако в действительности только в среднем за достаточно большое время можно утверждать, что «центр тяжести» отрицательного заряда находится в ядре изолированного атома. В данный момент электрон (если говорить для простоты об атоме водорода) может быть обнаружен в любой точке на расстоянии около 10^{-8} *см* от ядра. При сближении с другим атомом



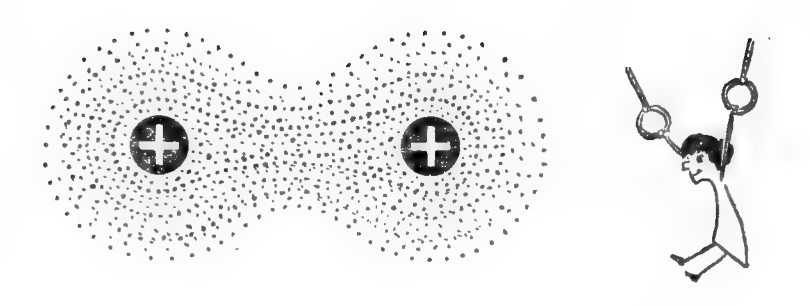
электрическое поле системы электрон — ядро возмущает движение электрона соседнего атома таким образом, что «центр тяжести» отрицательного заряда атома оказывается смещенным относительно ядра. Каждый атом (или молекула) поляризует своего соседа, и они начинают притягиваться друг к другу.

Это взаимодействие в основе своей является кулоновским. Но так как притяжение между нейтральными системами — следствие некоторого преобладания над существующим одновременно отталкиванием, и так как степень поляризации систем резко ослабевает с увеличением расстояния, то эти силы значительно слабее чисто кулоновских и гораздо быстрее убывают с расстоянием: обратно пропорциональны не квадрату, а *седьмой степени расстояния*. При увеличении расстояния в два раза сила ослабевает не в 4, а в 128 раз! Поэтому эти силы практически уже не сказываются, если расстояние в 10 раз превышает размеры самих молекул. Силы Ван-дер-Ваальса являются короткодействующими.

Химические силы

О том, что химические силы имеют электромагнитную природу, догадывался еще Фарадей. «Атомы материи, — писал он, — каким-то образом одарены электрическими силами или связаны с ними, и им они обязаны своими наиболее замечательными качествами и в том числе своим химическим сродством друг с другом». В настоящее время электрическая природа химических сил строго доказана.

Силы Ван-дер-Ваальса не способны объяснить образования молекул. Прежде всего для этого они слишком слабы. Но не это главное. Химическая связь, подобно тесной дружбе между людьми, обладает необычайным свойством *насыщения*. Атом водорода может присоединить к себе только один такой же атом, но ни в коем случае не два и не три. Атом углерода способен связать четыре атома водорода, но не более, и т. д. Это свойство с самого начала представляется загадочным. Ни один тип сил, с которыми мы имели дело до сих пор, не обладал свойством насыщения. Звезда, например, подобно оратору, который может взаимодействовать с аудиторией любой величины, способна притягивать к себе любое число планет.



Сила, действующая на одну из них, никак не зависит от наличия остальных. Не знают насыщения электромагнитные силы между заряженными частицами. Не знают его и силы молекулярного притяжения.

Свойство насыщения выражается в химии понятием валентности, которое было введено еще задолго до того, как ученые смогли приступить к выяснению природы химических сил.

Химическую связь в самых общих чертах можно объяснить как результат *коллективизации* внешних (валентных) электронов двух соединяющихся атомов. При определенных расстояниях между ядрами коллективизированные электроны, проходя между ядрами, компенсируют отталкивание последних. На больших расстояниях коллективизация не возникает и действуют только силы Ван-дер-Ваальса. Насыщение обусловлено ограниченным числом коллективизируемых электронов.

В простейшей молекуле — молекуле водорода — оба электрона ведут себя так, как если бы каждый электрон проводил часть времени возле одного ядра, а часть — возле другого. Именно поэтому возникающие вследствие коллективизации электронов силы называются часто *обменными*. Однако не следует слово «обмен» понимать слишком буквально, как колебания электронов от одного протона к другому. Такой наглядности, свойственной классической механике, нет. Истинный смысл *обменного эффекта* состоит в одновременной коллективизации двух электронов двумя одинаковыми ядрами.

Форма электронного облака молекулы водорода (H_2) сильно отличается от сферически симметричного

облака изолированных атомов. Получающаяся картина несколько напоминает делящуюся биологическую клетку до ее полного разделения.

Атомные ядра соответствуют ядрам дочерних клеток, а электронный заряд — протоплазме *). Протоплазменный тяж удерживает клетки друг возле друга, пока процесс деления не завершится. В случае молекулы ту же роль играет тяж из «электронной протоплазмы». Она вызывает взаимное притяжение ядер кулоновскими силами, как если бы некоторая часть отрицательного электрического заряда была сосредоточена между ними. При не слишком малых расстояниях между ядрами силы, вызванные коллективизацией электронов, с избытком компенсируют отталкивание ядер. При очень малых расстояниях часть отрицательного заряда, сосредоточенная между ядрами, становится недостаточной. Электроны как бы выталкиваются из промежутка между ядрами во внешнюю область, и расталкивание ядер уже не компенсируется.

Как притяжение, так и отталкивание получает, таким образом, полное объяснение.

При соединении различных атомов обобществленные электроны движутся несимметрично по отношению к обоим ядрам. В особенно резкой форме это имеет место у так называемых гетерополярных **) (разнородных) молекул, таких как поваренная соль (NaCl), соляная кислота HCl и др. У поваренной соли, например, связь осуществляется коллективизацией восьми валентных электронов: одного у натрия и семи у хлора. Так как остаточный заряд хлора больше, то все коллективизированные электроны сильно сдвигаются к иону хлора, и коллективизация выглядит как экспроприация одного электрона более «сильным» атомом у более «слабого». Последний становится, грубо говоря, положительным ионом, а первый — отрицательным, и химическая связь сводится к притяжению разноименных зарядов.

*) Здесь и в дальнейшем мы используем очень образное изложение природы химических сил, принадлежащее советскому физику Я. И. Френкелю.

**) В отличие от гомеополярных (однородных) молекул, таких, как молекула водорода.

Распределение электронов утрачивает полярный характер по мере уменьшения различия ядер, становясь совершенно симметричным в случае одинаковых атомов.

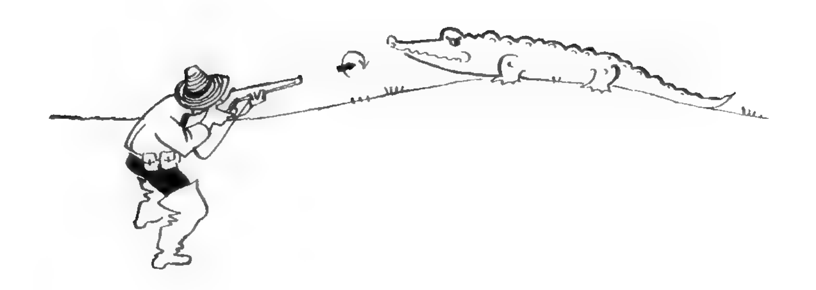
Молекулу нельзя представлять себе как сумму неизменных атомов, удерживаемых в равновесии силами притяжения и отталкивания. Это представление Берцелиуса 150-летней давности является грубо упрощенным.

Междуатомной связи нет в молекуле, потому что не существует атомов, которые могли бы объединиться в молекулу, оставаясь неизменными. Так, в молекуле водорода, строго говоря, нет атомов водорода, их индивидуальность растворяется при слиянии в новую систему. В ней содержится только «сырой материал», из которого они могут быть построены: два протона и два электрона. В этом коренное отличие химических сил от всех сил, с которыми мы познакомились ранее. Молекулу нужно рассматривать как сумму ядер, экранированных внутренними электронами, и коллективизированных внешних электронов, движение которых зависит от расстояния между ядрами.

Спин элементарных частиц

Теперь нам осталось уяснить подробнее последний важный момент: что определяет валентность атома? Здесь нам придется предварительно познакомиться с еще одним фундаментальным свойством элементарных частиц, о котором еще не было сказано ни слова. Это так называемый *спин*. Именно спин в сочетании с принципом Паули позволил Гайтлеру и Лондону в Англии построить квантовую теорию химической связи и объяснить валентность.

Спин наглядно соответствует как бы «собственным вращениям» частиц. Было бы, однако, наивно представлять себе что-то вроде волчков, вращающихся вокруг своей оси. Не нужно забывать, что частицы вовсе не шарики и вообще не тот объект, портрет которого мог бы написать самый изощренный художник. Во всяком случае художник-натуралист. Наши наглядные представления хороши для мира «больших вещей», для макромира, но мало чем могут



помочь, когда мы начинаем изучать явления микромира.

Здесь вы, с удивлением прочитав и то, что спин связан с собственным вращением, и то, что одновременно ни о каком наглядном механическом вращении частиц говорить нельзя, можете почувствовать, что с вами обращаются дурно, и спросить в упор: а что же такое спин?

Если из ствола нарезного ружья вылетает пуля, то она на лету вращается вокруг продольной, т. е. совпадающей с направлением полета, оси. Представьте теперь себе момент охоты очень сильно закрученными пулями (нечто в духе Мюнхаузена). Засевшая в мишени пуля сообщит ей свое вращение и мишень начнет вращаться в ту же сторону, что и пуля. Физики говорят, что вращательный момент, который первоначально был только у пули, распределился между



пулей и мишенью, в которой она застряла. Вращательный момент системы тел не может сам по себе, без воздействия со стороны, ни увеличиваться, ни уменьшаться. Это составляет суть закона сохранения вращательного момента или момента количества движения. Однако дело не в терминах. Для нас они не так уж важны. Не понадобится нам и точная формулировка этого важнейшего закона сохранения, по праву занимающего место рядом с законами сохранения энергии и количества движения. Важно усвоить только то, что по вращению мишени можно (причем точно, количественно!) судить о бывшем вращении пули.

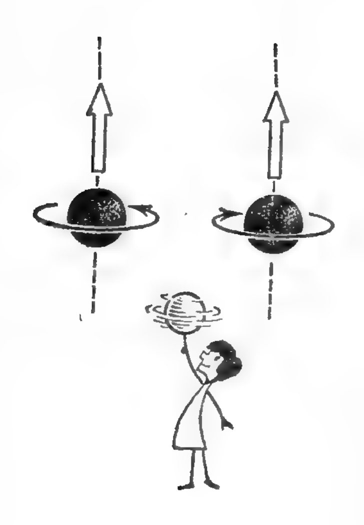
А теперь представьте себе, что мишень обстреливается электронами или другими элементарными частицами и поглощает их. Если все частицы закручены в одну сторону, то, поглощаясь, они должны сообщить вращение мишени. Так вот, чем больше спин, тем сильнее начнет *вращаться мишень.*

Нет нужды пытаться бесплодно искать объяснение спина в каких-либо механических картинках. В опытах с мишенью мы имеем принципиальную схему того, как этот спин можно *измерять*, а это уже очень много.

Конечно, мы коснулись лишь самой поверхности явления — за ней скрываются сложнейшие особенности законов движения и взаимодействия элементарных частиц... Однако уже эта внешняя сторона позволяет сравнивать спины различных частиц и дает тем самым некоторое представление о новом свойстве объектов микромира.

Разумеется, описанный нами опыт с мишенью является весьма грубым подобием реальных экспериментов, но мы не будем усложнять наш рассказ излишними деталями.

Итак, представьте себе, что мишень — пусть этой мишенью будет обычная копеечная монета — обстреливается из ружья, стреляющего элементарными частицами, закрученными в одну сторону. Здесь выявится замечательное обстоятельство. При равном числе попаданий целый ряд частиц — электроны, протоны, нейтроны и некоторые другие — передадут мишени одинаковый момент количества движения.



У них, следовательно, одинаковый спин. Частицы света — фотоны — передадут мишени вдвое больший вращательный момент, а отдельные частицы, как, например, π-мезоны, вообще не вызовут вращения. Их спин равен нулю.

Количественное значение спина очень точно известно: он равен либо 0, либо $\frac{\hbar}{2}$, либо $\hbar$, где $\hbar$ — знаменитая постоянная Планка — квант действия, с которой мы еще будем неоднократно встречаться в дальнейшем. У электрона спин равен $\frac{\hbar}{2}$. Постоянная Планка настолько мала (число с 27 нулями после запятой), что мишень-копейка будет совершать один оборот в секунду лишь в том случае, если мы будем продолжать ее обстрел 10 000 000 000 000 000 лет, делая по тысяче «выстрелов» в секунду. Может показаться, что вряд ли имеет смысл говорить о такой малой величине, однако не следует торопиться. Здесь ситуация примерно такая же, как если бы мы пытались вызвать вращение Луны, стреляя в нее из нарезного ружья. О «малом» или «большом» спине говорить не слишком разумно: в микромире действуют непривычные для нас масштабы. Важно, что спин существен во многих случаях, в частности при соединении атомов в молекулу.

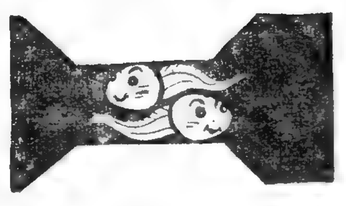
Электрон, как показывает опыт, может быть закручен только двумя способами: вращение электрона образует либо правый, либо левый винт с направлением его движения. Соответственно может закручиваться и мишень. Говоря другими словами, возможны только две ориентации спина по отношению к любому направлению. Поэтому, *если спин одного электрона фиксирован, то спин другого либо параллелен ему, либо антипараллелен.*

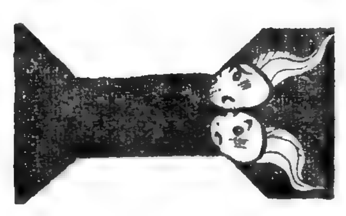
Что определяет валентность атомов!

Взаимная ориентация спинов оказывается решающим фактором при образовании молекулы водорода. Химическая связь возникает только в том случае, когда коллективизируемые электроны имеют противоположно направленные спины. При столкновении атомов водорода с параллельными спинами электроны также коллективизируются на некоторое время, но стабильных состояний не возникает. Коллективизация в этом случае приводит к появлению сил отталкивания независимо от расстояний между ядрами.

Дело в том, что *взаимная ориентация спинов определяет, согласно квантовой механике, характер движения электронов.* При антипараллельных спинах электроны проводят сравнительно большое время между ядрами, так что средняя плотность отрицательного заряда оказывается достаточной для компенсации отталкивания ядер. При параллельных спинах эта плотность мала, и происходит отталкивание.

Электроны с одинаково ориентированными спинами не могут разом втиснуться в промежуток между ядрами, как если бы это были два головастика, пытающихся одновременно, голова к голове, пролезть в узкую щель. Межъядерное пространство доступно для электронов с противоположно направленными спинами, равно как узкая щель — «антипараллельным» головастикам. Но, разумеется, кроме одинакового конечного результата здесь нет абсолютно ничего общего. Электрон не головастик и никакие сравнения, никакие ссылки на известные факты классической физики не помогут понять (если оставаться на позициях классики), почему ориентация спинов так существенно влияет на движение электронов: весь эффект чисто квантовый.





Итак, химические связи образуют пары электронов, имеющих антипараллельные спины.

Теперь все необходимое для объяснения насыщения и валентности налицо. Начнем с простого. Почему молекула водорода H_2 не может присоединить к себе еще один атом? Почему бы, например, сразу трем электронам не связать все три ядра?

Это запрещено принципом Паули. Коллективизированные электроны находятся в одном и том же квантовом состоянии и поэтому обязаны отличаться ориентацией спинов. Но возможны лишь две ориентации! Поэтому двум электронам с антипараллельными спинами разрешается осуществлять связь, но третий здесь оказывается абсолютно лишним.

После того как молекула водорода образована, она всегда будет отталкивать водородные атомы. Этим и объясняется насыщение.

Вот еще на что здесь нужно обратить внимание. Каждый из водородных атомов, сливающихся в молекулу, имеет *по одному электрону с произвольно ориентированным спином.* Молекула водорода имеет *пару электронов с антипараллельными спинами* и не присоединяет к себе новых атомов.

Этот факт имеет совершенно общее значение. Электроны, образующие пары с антипараллельными спинами, в каждом из атомов не принимают участия в химической связи. Эту связь могут осуществлять лишь *электроны со свободными спинами.*

Во внутренних целиком заполненных оболочках электроны всегда образуют пары и не участвуют в химической связи. Такой же характер имеют внешние оболочки благородных газов, которые по этой причине в невозбужденном состоянии совершенно не активны химически. Лишь в том случае, если внешняя оболочка атома не заполнена целиком, ее электроны могут создавать химическую связь.

Но не все электроны! Число электронов, обладающих «свободными» спинами, а следовательно и *валентность атома, равно либо числу внешних электронов, не входящих в замкнутые оболочки, либо же числу электронов, недостающих до завершения оболочки, в зависимости от того, какое из этих чисел меньше.*

Таким образом, несмотря на ничтожную в макроскопических масштабах величину, спин электрона определяет всю «химию» атомов. Протекая в больших масштабах, химические реакции, начиная от простого горения и кончая сложнейшими превращениями внутри живого организма, вызывают изменения в мире, преобразующие весь его облик.

Газы, жидкости и твердые тела

Если в самых общих чертах попробовать представить себе строение газов, жидкостей и твердых тел, то можно нарисовать следующую картину. Молекулы (или атомы) газа стремительно, как бегуны-спринтеры, проносятся в пространстве, заполненном газом. Расстояния между ними значительно превышают их собственные размеры. Непрерывно сталкиваясь друг с другом на лету, они дикими зигзагами бросаются из стороны в сторону.

Молекула жидкости ведет себя иначе. Зажатая, как в клетке, между другими молекулами, она совершает бег на месте (колеблется около положения равновесия). Лишь время от времени она совершает прыжок, прорываясь сквозь «прутья клетки», но тут же попадает в новую клетку, образованную новыми соседями. Время оседлой жизни продолжается около десятимиллионной доли секунды.

Атомы твердых тел не в силах разорвать «путы», связывающие их с ближайшими соседями, и обречены совершать только бег на месте. Правда, и они могут иногда покидать положения равновесия, но происходит это редко.

Нельзя обойти молчанием еще одно важное различие между жидкими и твердыми телами. Жидкость, грубо говоря,— это беспорядочная, тесно сжатая толпа индивидуумов, беспокойно толкущихся на месте. Твердое же тело, как правило,— это стройная когорта, индивидуумы которой хотя и не стоят по стойке смирно вследствие теплового движения, но выдерживают между собой определенные интервалы. Если соединить центры положений равновесия атомов или молекул, то получится правильная решетка (пространственная, конечно, а не плоскостная), которая называется кристаллической. Большинство твердых тел имеет кристаллическую структуру.

Лишь у аморфных тел, как, например, у стекла, в расположении молекул нет строгого порядка. Их по этой причине часто даже не хотят относить в разряд твердых тел, рассматривая как очень вязкие, почти целиком лишенные текучести жидкости.

Упругие свойства жидкостей и газов

Теперь вы располагаете необходимыми сведениями, чтобы понять происхождение упругих сил в жидкостях и газах. При желании с этим делом вы можете справиться сами. Попробуйте, и, если не поленитесь, придумаете то, о чем можно прочесть ниже. Читать же будет скучновато, так что можно продолжать чтение прямо с рассказа о поверхностном натяжении, где дело обстоит много сложнее.

В газах и жидкостях (кроме жидких металлов) из сил притяжения действуют только силы Ван-дер-Ваальса, а в твердых телах еще и обменные силы.

Силы Ван-дер-Ваальса удерживают молекулы жидкости друг возле друга на близких расстояниях порядка размеров самих молекул. Если попытаться жидкость сжать, то молекулы ее начнут сближаться друг с другом и между ними будут быстро нарастать силы отталкивания. Причем молекулы расположены столь тесно,что уже при незначительном сближении силы отталкивания достигают большой величины.

Не правда ли, понять это ничуть не сложнее, чем понять, почему так трудно втиснуться в переполненный автобус.

Не намного труднее объяснить, отчего жидкость текуча, не способна сохранять свою форму. Под влиянием внешней силы (обычно это притяжение к Земле) перескоки молекул жидкости, о которых шла речь, происходят в направлении действия силы, и жидкость в результате течет. Надо только, чтобы время действия силы было много больше времени оседлой жизни молекул. В противном случае сила вызовет лишь упругую деформацию сдвига и обычная вода будет тверда как сталь.

При нагревании энергия теплового движения молекул растет, перескоки молекул учащаются. В конце концов силы Ван-дер-Ваальса оказываются не в состоянии удержать рвущиеся во все стороны мо-

лекулы, и жидкость перестает существовать. Образуется газ.

Молекулы газа разлетаются во все стороны, и молекулярное притяжение уже не властно над ними. Вещество перестает сохранять не только форму, но и объем. Как бы мы ни расширяли сосуд, содержащий газ, он заполнит его целиком без каких-либо усилий с нашей стороны.

Барабанная дробь бесчисленных ударов газовых молекул о стенки сосуда создает давление.

Поверхностное натяжение

Такие силы, как тяготение, упругость и трение, бросаются в глаза; мы ощущаем их непосредственно каждый день. Но в окружающем нас мире повседневных явлений действует еще одна сила, на которую мы обычно не обращаем никакого внимания. Сила эта сравнительно невелика, ее действия никогда не вызывают мощных эффектов. Тем не менее мы не можем налить воды в стакан, вообще ничего не можем проделать с какой-либо жидкостью без того, чтобы не привести в действие силы, о которых у нас сейчас пойдет речь. Это силы поверхностного натяжения.

К вызываемым поверхностным натяжением эффектам мы настолько привыкли, что не замечаем их, если не развлекаемся пусканием мыльных пузырей. Однако в природе и нашей жизни они играют немалую роль. Без них мы не могли бы писать чернилами. Обычная ручка не зачерпнула бы чернил из чернильницы, а автоматическая сразу же поставила бы большую кляксу, опорожнив весь свой резервуар. Нельзя было бы намылить руки: пена не образовывалась бы. Слабый дождик промочил бы нас насквозь, а радугу нельзя было бы видеть ни при какой погоде. Нарушился бы водный режим почвы, что оказалось бы гибельным для растений. Пострадали бы важные функции нашего организма.

Проще всего уловить характер сил поверхностного натяжения, наблюдая образование капли у плохо закрытого или неисправного крана. Всмотритесь внимательно, как постепенно растет капля, образуется сужение — шейка, и капля отрывается. Не нужно много фантазии, чтобы представить себе,



что вода как бы заключена в эластичный мешочек, и этот мешочек разрывается, когда вес превысит его прочность. В действительности, конечно, ничего, кроме воды, в капле нет, но сам поверхностный слой воды ведет себя как растянутая эластичная пленка.

Такое же впечатление производит пленка мыльного пузыря. Она походит на тонкую растянутую резину детского шарика. Если вынуть соломинку из рта, то пузырь вытолкнет воздух и сожмется.

Осторожно положите иглу на поверхность воды. Поверхностная пленка прогнется и не даст игле утонуть. По этой же причине легкие водомерки могут быстро скользить по поверхности воды, как конькобежцы по льду.

Прогиб пленки не позволит выливаться воде, осторожно налитой в достаточно частое решето. Так что можно «носить воду в решете». Это показывает, как трудно порой, даже при желании, сказать настоящую бессмыслицу. Ткань — это то же решето, образованное переплетением нитей. Поверхностное натяжение сильно затрудняет просачивание воды сквозь нее, и потому она не промокает насквозь мгновенно.

В своем стремлении сократиться поверхностная пленка придавала бы жидкости сферическую форму, если бы не тяжесть. Чем меньше капелька, тем большую роль играют поверхностные силы по сравнению с объемными (тяготением). Поэтому маленькие капельки росы близки по форме к шару. При свободном падении возникает состояние невесомости, и поэтому дождевые капли почти строго шарообразны *). Из-за преломления солнечных лучей в этих каплях воз-

*) Небольшое отступление от сферичности капель вызвано сопротивлением воздуха. Внутри кабины космического корабля пролитая вода собралась бы в правильный парящий шар.

никает радуга. Не будь капли сферическими, не было бы, как показывает теория, и радуги.

Проявления сил поверхностного натяжения столь многообразны, что даже перечислить их в нашей книге нет никакой возможности *). Но почему возникают эти силы, мы обязаны хотя бы кратко рассказать.

Если большая группа индивидуумов наделена свойством притягивать друг друга или индивидуумы по своей воле устремляются друг к другу, то результат будет один: они соберутся в ком, подобный пчелиному рою. Каждый индивидуум «стремится» внутрь этого кома, в результате чего поверхность кома сокращается, приближаясь к сфере. Перед вами модель возникновения поверхностного натяжения.

Молекулы воды (или другой жидкости), притягиваемые друг к другу силами Ван-дер-Ваальса,— это и есть собрание индивидуумов, стремящихся сблизиться. Каждая молекула на поверхности притягивается своими собратьями и потому имеет тенденцию к погружению вглубь как в жидких, так и в твердых телах. Но жидкость, в отличие от твердых тел, текуча из-за перескоков молекул из одного «оседлого» положения в другое. Это позволяет жидкости принимать форму, при которой число молекул на поверхности было бы минимальным, а минимальную поверхность при данном объеме имеет шар. Поверхность жидкости сокращается, и мы воспринимаем это как поверхностное натяжение.

Здесь обнаруживается, что происхождение поверхностных сил совсем иное, чем упругих сил растянутой резиновой пленки. И это действительно так. При сокращении резины упругая сила ослабевает, а силы поверхностного натяжения никак не меняются по мере сокращения поверхности пленки, так как среднее расстояние между молекулами не меняется.

Таким образом, возникновение поверхностных сил нельзя объяснить столь просто и наглядно, как сил упругости, где все связано с изменением

*) Это сделано в прекрасной книге Ч. Бойса «Мыльные пузыри».

расстояний между молекулами. Здесь все сложнее, ибо силы поверхностного натяжения проявляются при сложной перестройке формы всей жидкости без изменения ее объема.

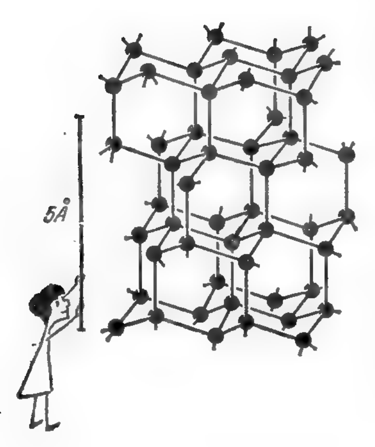
Четыре типа кристаллов

Алмаз и парафиновая свеча... Первый — символ твердости; парафин, подобно воску, мягок и податлив. Сразу можно подумать, что полярности свойств соответствует полярность способов сочленения в единое целое тех отдельных элементов, из которых состоят эти вещества.

Подумав так, вы не ошибетесь. Парафин состоит из отдельных молекул, связанных друг с другом силами Ван-дер-Ваальса. Кристалл алмаза можно рассматривать как одну гигантскую молекулу. Силы молекулярного притяжения значительно слабее химических еил и соответственно парафин не идет ни в какое сравнение по твердости с алмазом.

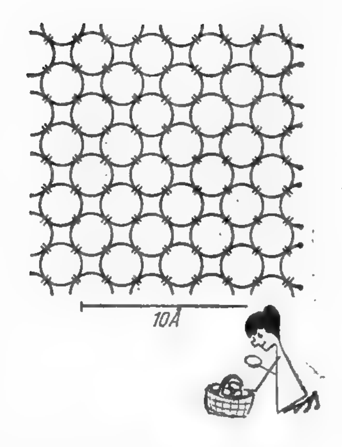
Кристаллы, состоящие из обособленных молекул, называются *молекулярными* *). Алмаз — *валентный кристалл.*

Такое название дано ему неспроста. Число ближайших соседей каждого атома углерода в алмазе равно его валентности, т. е. четырем. Любые два соседа налаживают между собой парноэлектронную связь, выделяя для этого по одному электрону. Но не надо думать, что коллективизированная пара принадлежит лишь двум атомам. От атома к соседям ведут четыре тропинки (связи), и данный валентный электрон может двигаться по любой из них. Дойдя до соседнего атома, он может перейти к



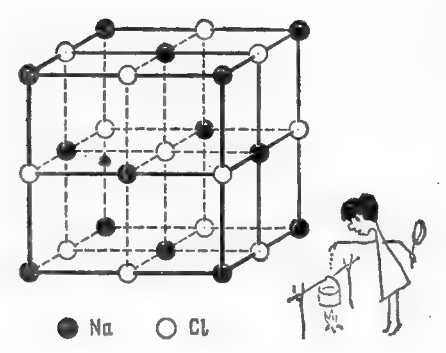
*) К молекулярным кристаллам относятся кристаллы, состоящие из гомеополярных молекул: водорода, азота и др. Сухой лед (твердая углекислота) и многие органические вещества являются также молекулярными кристаллами.

следующему и блуждать по тропинкам — связям вдоль всего кристалла. На плоской схеме кристаллическую решетку алмаза можно изобразить в виде плотно прижатых друг к другу кружков, а парноэлектронные валентные связи — в виде штрихов в точках касания.



Единственное непреложное правило, которое должны выполнять электроны, диктуется принципом Паули: по одной «тропинке» не могут двигаться одновременно более двух электронов. Коллективизированные валентные электроны принадлежат всему кристаллу в целом, и поэтому кристалл — это в сущности колоссальная молекула.

Парноэлектронные связи алмаза очень прочны и не рвутся с увеличением интенсивности тепловых колебаний атомов, т. е. с ростом температуры. Поэтому алмаз не проводит электрического тока. Участвующие в связи атомов валентные электроны прочно привязаны к кристаллической решетке, и внешнее электрическое поле не оказывает заметного влияния на их движение. Кристаллы кремния и германия подобны кристаллу алмаза, но у них парноэлектронные связи не столь прочны. Небольшое нагревание вызывает разрыв отдельных связей. Электроны покидают проторенные тропы и обретают свободу. Во внешнем электрическом поле они перемещаются между узлами решетки, образуя электрический ток. Подобного рода вещества называются полупроводниками.



Коллективизация валентных электронов

связывает также атомы так называемых *ионных кристаллов*: поваренной соли (NaCl), бромистого серебра (AgBr) и др. У молекулы NaCl, как вы помните, коллективизация в сущности сводится к экспроприации хлором одного электрона натрия. То же самое происходит в кристалле поваренной соли. Все валентные электроны фактически движутся по хлорным узлам решетки и кристалл, грубо говоря, состоит из ионов противоположных знаков. Связь в этом случае обеспечивается электростатическими силами притяжения.

Четвертый тип кристаллов — это *металлы и сплавы*. При образовании куска металла из отдельных атомов валентные электроны полностью утрачивают связь с атомами и становятся «собственностью» всего куска в целом. Положительные ионы «плавают» в отрицательной «жидкости», образованной коллективизированными электронами. Эта «жидкость» заполняет все промежутки между ионами и стягивает их кулоновскими силами. Связь имеет, таким образом, химическую природу, как и у валентных кристаллов *).

Но отличие от валентных кристаллов велико. В случае валентных кристаллов коллективизированные электроны циркулируют по строго определенным путям между соседними атомами. В металле электроны оказываются свободными и могут перемещаться по всему куску в любых направлениях. Это проявляется ясно и отчетливо. Металлы и сплавы хорошо проводят электрический ток, в то время как валентные кристаллы в большинстве своем являются изоляторами.

Очень слабая связь валентных электронов металла с атомами,— вот причина той относительной свободы, которую имеют электроны внутри металлов. У валентных кристаллов эта связь значительно прочнее.

Таким образом, только в молекулярных кристаллах связь осуществляется силами Ван-дер-Ваальса. В остальных твердых телах в той или иной форме происходит коллективизация электронов. В аморфных телах, правда, часто происходит наложение

*) Природа связи в жидких металлах та же, что и в твердых.

связей различной природы. В стеклах одновременно имеет место валентное и ионное взаимодействие; в сложных органических соединениях — одновременно валентное и молекулярное.

Конец цепочки вопросов

После всего сказанного о силах между атомами и молекулами и о строении твердых тел уже совсем просто ответить на вопрос о том, почему при прогибе стола возникают силы упругости. (Менее просто построить количественную теорию, но мы этого и не собираемся делать.)

Будет ли стол деревянным, пластмассовым или металлическим — во всех случаях при сжатии атомы сближаются друг с другом и начинают из-за этого отталкиваться. Возникает сила упругости. Растяжению будут препятствовать силы сцепления между атомами и молекулами.

Положенная на стол книга слегка сжимает верхнюю часть доски и растягивает нижнюю. Это продолжается до тех пор, пока расстояния между атомами не изменятся настолько, что упругая сила уравновесит книгу. Если книгу снять, то межатомные расстояния восстановятся, и поверхность стола примет прежнюю форму.

Здесь все просто. Если вы поняли главное — природу электрических сил между нейтральными системами,— то тогда с полным правом можете утверждать, что происхождение сил упругости перестало быть для вас загадкой.

Сухое трение

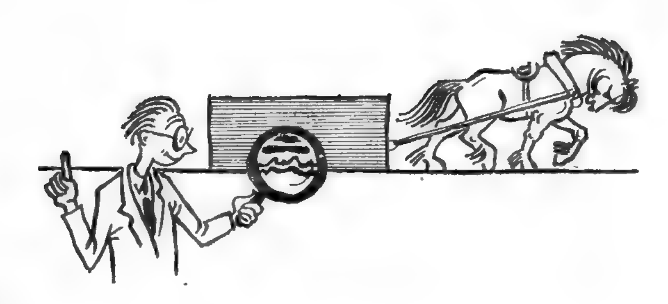
Итак, мы знаем, почему книга не проваливается сквозь стол. Но что мешает ей соскользнуть, если стол немного наклонен? Конечно, трение!

На первый взгляд объяснить происхождение силы трения очень просто. Ведь поверхность стола и обложка книги шероховаты. Это чувствуется на ощупь, а под микроскопом видно, что поверхность твердого тела более всего напоминает горную страну. Бесчисленные выступы цепляются друг за друга, немного деформируются и не дают книге скользить. Таким образом, сила трения покоя вызвана теми же силами взаимодействия молекул, что и обычная упругость.

Вы увеличили наклон стола, и книга начала скользить. Очевидно, при этом начинается «скалывание» бугорков, разрыв молекулярных связей, не способных выдержать возросшую нагрузку. Сила трения по-прежнему действует, но это уже будет сила трения скольжения. Обнаружить «скалывание» бугорков не представляет труда: результатом такого «скалывания» является износ трущихся деталей.

Казалось бы, чем тщательнее отполированы поверхности, тем меньше должна быть сила трения. До известной степени это так. Шлифовка снижает, например, силу трения между двумя стальными брусками. Но не беспредельно! Сила трения внезапно начинает расти при дальнейшем увеличении гладкости поверхности. Это неожиданно, но все же объяснимо.

По мере сглаживания поверхностей они все теснее и теснее прилегают друг к другу. Однако до тех пор, пока высота неровностей превышает несколько молекулярных радиусов, силы взаимодействия между молекулами соседних поверхностей отсутствуют. Ведь это очень короткодействующие силы. Лишь при достижении некоего совершенства шлифовки поверхности сблизятся настолько, что силы сцепления молекул включатся в игру. Они начнут препятствовать смещению брусков друг относительно друга, что и обеспечивает силу трения покоя. При скольжении гладких брусков молекулярные связи между их поверхностями рвутся подобно тому, как у шероховатых поверхностей разрушаются связи внутри самих бугорков. Разрыв молекулярных связей — вот то главное, чем отличаются силы трения



от сил упругости, при возникновении которых таких разрывов не происходит. Из-за этого силы трения зависят от скорости.

Часто в популярных книгах и научно-фантастических рассказах рисуют картину мира без трения. Так можно очень наглядно показать как пользу, так и вред трения. Но не надо забывать, что в основе трения лежат электрические силы взаимодействия молекул. Уничтожение трения фактически означало бы уничтожение электрических сил, и, следовательно, неизбежный полный распад вещества.

Трение в жидкостях и газах

При движении двух соседних слоев жидкости друг относительно друга между ними имеется идеальный контакт, неосуществимый при соприкосновении твердых поверхностей, как бы тщательно они ни были отшлифованы. Молекулы более быстрого слоя увлекают за собой молекулы медленного слоя, так как между ними действует молекулярное притяжение, и в свою очередь тормозятся ими. В этом причина вязкости или внутреннего трения в жидкостях.

Из-за текучести жидкости здесь уже не происходит разрыва всех молекулярных связей, как при скольжении твердых поверхностей. Часть молекул «перескакивает» в направлении действия молекулярных сил. Величина трения обратно пропорциональна текучести жидкости и значительно уступает по величине сухому трению, если только относительная скорость слоев жидкости не очень велика *).

В газах среднее расстояние между молекулами столь велико, что молекулярное притяжение не может вызвать трения между слоями газа, движущимися друг относительно друга. Если бы молекулы не вылетали за пределы этих слоев, то не было бы трения. Но тепловое движение выбрасывает молекулы за границы слоев. Попадая из быстрого слоя в медленный, молекулы при столкновениях ускоряют этот слой, а молекулы медленного слоя, проникая

*) Надо заметить, что физические процессы как при сухом, так и при жидком трении крайне сложны, и удовлетворительной количественной теории этих явлений не существует до сих пор.

в быстрый, тормозят его. Появление ускорений означает появление сил. Однако в газах силы трения в сотни раз меньше, чем в жидкостях.

Силы нашших мышц

Гравитация непрерывно прижимает нас к Земле, силы упругости поддерживают на ее поверхности. Трение позволяет нам свободно перемещаться. Помогает жить поверхностное натяжение. Все это — силы неживой природы. Большинством из них мы можем управлять. Но можем лишь потому, что к нашим услугам силы, беспрекословно подчиненные велениям разума без всяких механических посредников. Это силы наших мышц.

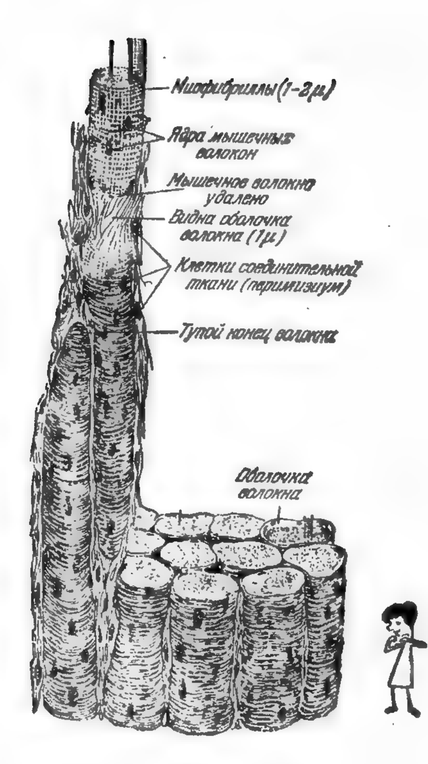
Мышца — один из самых замечательных «механизмов», созданных природой. Прежде всего это очень экономичная машина, продуктивно использующая около 45% той химической энергии, которую она потребляет. Мышцы черепахи имеют к. п. д. до 80%. Самая лучшая паровая турбина имеет к.п.д. не более 40%.

Сила, развиваемая мышцей, заслуживает всяческого уважения. Каждый может встать на цыпочки на одной ноге даже с грузом. Значит, икроножная мышца способна поднять около 100 килограммов. Если же учесть, что стопа представляет собой рычаг и мышца прикреплена к короткому плечу этого рычага, то мы получим еще более солидную цифру: почти тонну. И все это при условии, что человек не может по своей воле заставить ее дать максимальное сокращение. Если регуляция со стороны нервной системы будет нарушена и мышца разовьет свою полную силу, то она способна оторвать кусочек кости, к которой прикреплена.

А поразительная работоспособность мышцы! Сердечная мышца совершает работу день и ночь, непрерывно, без всякого ремонта на протяжении многих десятков лет. На это не способна пока еще ни одна машина, созданная человеком. Работа над созданием искусственного сердца только начинается.

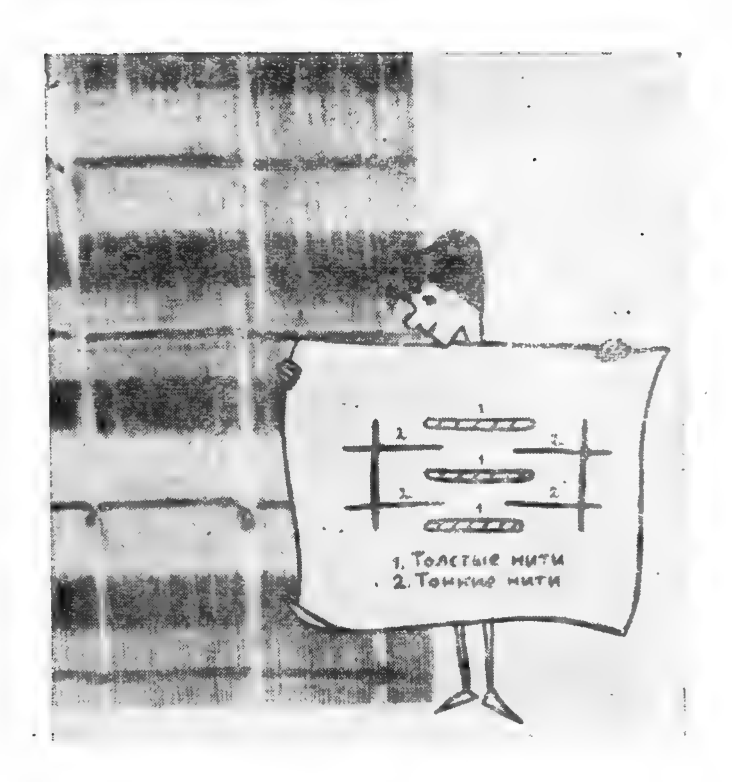
В основе всей деятельности мышцы лежат сложные химические превращения внутри клеток. Мы не будем говорить обо всех имеющихся здесь проблемах, которые, кстати сказать, остаются в основном

нерешенными и до сего времени, даже несмотря на значительные успехи: в последние годы четверо ученых были удостоены Нобелевских премий за работы по выяснению химии мышц. Мы расскажем лишь об одном: как возникает мышечная сила? Что заставляет мышцу сокращаться?



Разрезая бифштекс, вы видите, что мышца имеет волокнистое строение. Под микроскопом хорошо просматриваются тысячи мышечных волокон — длинных цилиндров, уложенных правильными рядами. Каждое волокно — это не одна клетка, а их множество с коллективизированной цитоплазмой и обособленными ядрами. Волокна представляют собой удлиненные палочки — мицелы, построенные из пучков белковых молекул — основного строительного материала живых тканей.

Каждое волокно, как показали исследования с помощью электронного микроскопа, состоит в свою очередь из 1000—2000 более тонких волокон — миофибрилл. В свою очередь, каждая миофибрилла построена из толстых и тонких белковых нитей. Толстые нити образованы белком — миозином, а тонкие — актином. На рисунке показана электронная микрофотография миофибриллы. Черные перегородки (так называемые *z*-линии) делят миофибриллу на отдельные участки — саркомеры. Схема саркомера показана на том же рисунке. Тонкие нити актина прикреплены к *z*-линиям, а толстые расположены посредине саркомера.



Каждая толстая нить состоит из 180—360 продольно ориентированных тонких миозиновых нитей — «хвостов» — с утолщениями — «головами» — на концах. «Хвосты» уложены в нити параллельно друг другу, а «головы» выступают во все стороны толстой нити. «Головы» могут касаться актиновых нитей, образуя мостики между миозиновыми и актиновыми нитями.

При сокращении мышцы *z*-линии движутся навстречу друг другу и тонкие нити актина скользят между толстыми нитями миозина. В этом состоит скользящая модель мышц, установленная с достоверностью экспериментально.

Главная трудность заключается в объяснении того, каков же механизм, приводящий к скольжению тонких и толстых нитей друг относительно друга. Здесь общепринятой теории пока нет. Наиболее

интересная, пожалуй, теория предложена совсем недавно известным советским физиком-теоретиком А. С. Давыдовым. Расскажем о ней вкратце.

«Хвост» молекулы миозина представляет собой спираль. Спиральная форма молекулы поддерживается водородными связями между группами атомов соседних витков. В молекуле имеется три линейные цепочки такого рода связей. Согласно идее Давыдова вдоль каждой цепочки могут распространяться продольные возбуждения. Силы, действующие между соседними витками, нелинейны из-за того, что изменения расстояний между витками индуцируют изменения электрических дипольных моментов взаимодействующих групп атомов. Благодаря этой нелинейности вдоль цепочки водородных связей может бежать импульс сжатия (или растяжения), не меняющий своей формы. Подобного рода импульсы давно известны в нелинейной теории колебаний и называются *солитонами*. В частности, волны цуна́ми, возникающие в океане при подземных извержениях вулканов или землетрясениях, также представляют собой солитоны.

Давыдов доказал, что благодаря силовым связям только вдоль двух цепочек водородных связей из трех могут одновременно распространяться солитоны. Из-за этого молекула миозина изгибается и этот изгиб движется вдоль молекулы со скоростью солитона. «Головы» молекул миозина касаются при этом нитей актина, образуя мостики. Со стороны мостиков на нити актина, закрепленные на *г*-перегородках, действует сила. Это некий вид химической (а значит электромагнитной) силы. Ее можно считать аналогичной силе трения. По третьему закону Ньютона на толстую нить со стороны мостика действует сила, направленная в сторону, противоположную направлению движения солитонов. Из-за этого миозиновая нить движется между нитями актина подобно змее, проползающей сквозь трубу.

Скольжение нитей друг относительно друга и приводит к сокращению мышцы.

Но каким же образом из нашего желания перевернуть страницу книги в конце концов возникает движение солитонов в миозиновых нитях? На этот

вопрос вы не найдете ответа в нашей книге. Не найдете пока и ни в какой другой. Сложная цепь протекающих здесь процессов далеко еще не прослежена во всех своих звеньях.

4.

Заряженные частицы над нами и вокруг нас

Естественное состояние тел на поверхности Земли — как атомов и молекул, так и больших кусков вещества — электрическая нейтральность. Однако если вы зарядите электроскоп, то через некоторое время он потеряет весь свой заряд, какой бы тщательной ни была изоляция. Значит, в воздухе вокруг нас немало заряженных частиц — ионов и пылинок. Шарик электроскопа «всасывает» в себя из атмосферы ионы противоположного знака и становится нейтральным.

Высоко над нами простирается толстый слой сильно ионизированного газа — ионосфера. Она начинается в нескольких десятках километров от поверхности Земли и достигает четырехсот километров в высоту. Электроскопом ее не обнаружишь. Для открытия ионосферы понадобилось изобретение радио. Слой сильно ионизированного газа хорошо проводит электрический ток и подобно металлической поверхности отражает радиоволны с длиной волны, превышающей 30 метров. Не будь ионосферного «зеркала» вокруг Земли, радиосвязь на коротких волнах была бы возможна только в пределах прямой видимости.

Три поставщика

Итак, ионы вокруг нас и над нами есть. Но ведь они недолговечны. Случайная встреча разноименных ионов,— и они перестают существовать. Значит, должны существовать какие-то непрерывно действующие процессы, поставляющие ионы.

Таких поставщиков целых три. У поверхности Земли — это излучение радиоактивных элементов, содержащихся в земной коре в небольших количест-

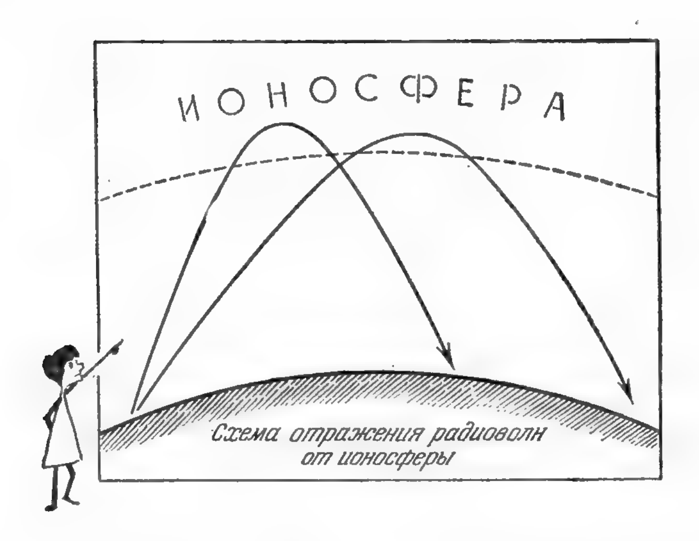


Схема отражения радиоволн от ионосферы

вах. На больших высотах — ультрафиолетовое излучение Солнца. И, наконец, всю толщу атмосферы сверху донизу пронизывают потоки очень быстрых заряженных частиц — космические лучи. Небольшая часть их идет от Солнца, а остальные — из глубин космического пространства нашей Галактики.

Иногда с поверхности Солнца вырываются особенно мощные потоки заряженных частиц. На высоте нескольких сот километров над Землей их электромагнитные поля возбуждают атомы и заставляют излучать свет. Тогда мы видим северные (полярные) сияния. Разыгрываются они преимущественно на высоких широтах, и жителям умеренных поясов почти никогда не доводится наслаждаться изумительной красоты игрой световых столбов, переливающихся всеми цветами радуги.

Молния

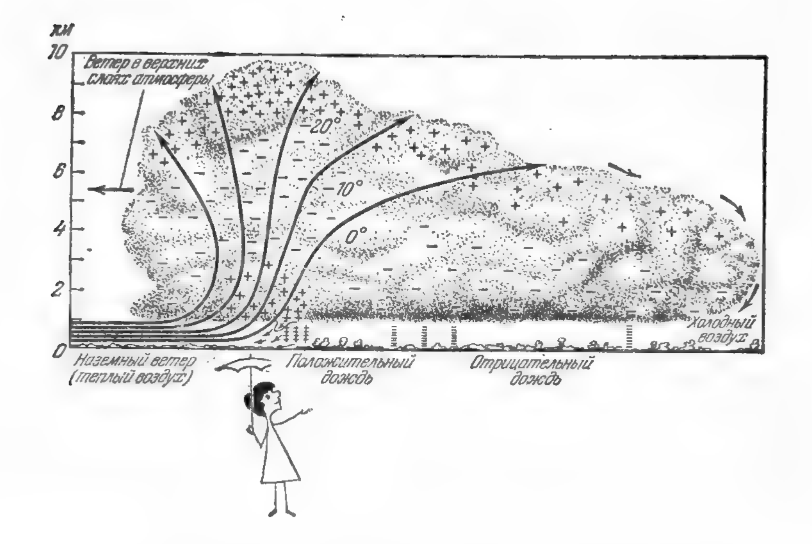
Зато всем знаком грозовой разряд. Чудовищное накопление в облаке электричества одного знака вызывает искру, длина которой иногда превышает десятки километров. Прихотливо изменяя свой путь в зависимости от проводимости воздуха молния часто производит поразительные эффекты. Наиболее удивительные из них приведены в книге «Атмосфера» французского астронома Фламмариона.

«Никакая театральная пьеса, никакие фокусы не могут соперничать,— пишет Фламмарион,— с молнией по неожиданности и странности ее эффектов. Она кажется каким-то особым веществом, чем-то средним между бессознательными силами природы и сознательной душою человека; это — какой-то дух, тонкий и причудливый, хитрый и тупой в то же время, ясновидящий или слепой, обладающий волей или подневольный, переходящий из одной крайности в другую, страшный и непонятный. С ним не сговоришься, его не поймаешь. Он *действует* и только. Действия его, без сомнения, так же, как и наши, только кажутся капризами, а на самом деле подчинены каким-то неизменным законам. Но до сих пор мы не могли уловить этих законов. Здесь он наповал убивает и сжигает человека, не только пощадив, но даже не коснувшись его одежды, которая остается нетронутой. Там он раздевает человека догола, не причинив ему ни малейшего вреда, ни одной царапины. В другом месте он ворует монеты, не повредив ни кошелька, ни кармана. То он срывает позолоту с люстры и переносит ее на штукатурку стен; то разувает путника и отбрасывает его обувь на десять метров в сторону, то, наконец, в одном селении пробуравливает в центре стопку тарелок и притом попеременно, через две штуки... Какой тут можно установить порядок».

Далее перечисляется около сотни различных случаев. Например: «У одного очень волосатого человека, застигнутого грозой около Э., молния сбрила волосы полосами, вдоль всего тела, скатала их в клубочки и глубоко засунула в толщу икряных мышц». Или еще: «Летом 1865 года один врач из окрестностей Вены, доктор Дрендингер, возвращался домой с железной дороги. Выходя из экипажа, он хватился своего портмоне; оказалось, что его украли.

Это портмоне было черепаховое, и на одной из его крышек находился инкрустированный стальной вензель доктора: два переплетенных между собой Д.

Несколько времени спустя доктора позвали к иностранцу, «убитому» молнией и найденному без чувств под деревом. Первое, что доктор заметил на



ляжке больного, был его собственный вензель, как бы только что сфотографированный. Можно судить об его удивлении! Больной был приведен в чувство и перенесен в госпиталь. Там доктор заявил, что в карманах больного где-нибудь должно находиться его черепаховое портмоне, что оказалось вполне справедливым. Субъект был тот самый вор, который стащил портмоне, а электричество заклеймило его, расплавив металлический вензель».

Любопытно, что в приведенной Фламмарионом статистике число убитых женщин чуть ли не втрое меньше, чем мужчин. Это, конечно, объясняется не галантностью молнии, а просто тем, что в те времена (начало XX века) во Франции мужчины чаще бывали на полевых работах.

Недавно в американских газетах сообщалось о случае, достойном Фламмариона. Молния ударила в холодильник и зажарила в нем курицу, которая затем была благополучно охлаждена, так как холодильник остался исправным.

Можно, конечно, сомневаться в достоверности всех приведенных случаев, но нельзя не согласиться с тем, что молния действительно способна вытворять чудеса. Объяснить их не всегда оказывается возмож-

ным. Разряд длится всего лишь около стотысячной доли секунды, и к наблюдению его в таких исключительных случаях никакой подготовки не бывает. Повторить же потом событие заново невозможно: вы не создадите точно такую же молнию, не говоря уже о прочих условиях.

Но в принципе не так уж все таинственно, как казалось Фламмариону. В конце концов все сводится к таким обычным действиям тока, как нагревание, электромагнитное поле и химические реакции. Только ток громадный: десятки, а то и сотни тысяч ампер.

Главное не в том, чтобы разобраться в бесчисленных курьезах. Нужно понять, каким образом в грозовом облаке накопляется электрический заряд. Что вызывает электризацию водяных капель, и почему заряды противоположного знака пространственно разделены внутри облака? Здесь еще далеко не все ясно до конца.

Прежде всего, нет единого механизма заряжения капель.

Достоверно известно несколько таких механизмов, и трудно оценить, какой из них играет основную роль. Вот два из них. В электрическом поле Земли (мы уже упоминали, что земной шар заряжен отрицательно) капля воды поляризуется. На нижней ее части накапливается положительный заряд, а на верхней — отрицательный. Крупная капля при своем падении преимущественно захватывает отрицательные ионы воздуха и приобретает электрический заряд. Положительные ионы уносятся вверх восходящим потоком воздуха.

Другой механизм — это заряжение капель при их дроблении встречными потоками воздуха. Мелкие брызги заряжаются отрицательно и уносятся вверх, а крупные, заряженные положительно, падают вниз.

Оба эти механизма обеспечивают как заряжение капель, так и пространственное разделение зарядов противоположного знака внутри облака. Обычно в нижней части грозового облака накапливается отрицательный заряд (за исключением небольшой, положительно заряженной области), а в верхней — положительный.

Гораздо хуже обстоит дело с объяснением шаровой молнии, которая иногда появляется после сильного разряда линейной молнии. Обычно это светящийся шар диаметром 10—20 сантиметров. Нередко она напоминает «котенка средней величины, свернувшегося клубочком и катящегося без помощи ног». Касаясь предметов, шаровая молния может взорваться, причиняя значительные разрушения.

Шаровая молния, пожалуй, единственное макроскопическое явление на Земле, которое до сих пор не имеет достоверного объяснения. Разряд шарового типа не удается получить в лаборатории. В этом все дело.

Огни святого Эльма

Перед грозой или во время ее нередко на остриях и острых углах высоко поднятых предметов вспыхивают похожие на кисточки конусы света. Этот медленный и мирно совершающийся разряд называют с давних времен огнями святого Эльма.

Еще у Тита Ливия можно прочесть, что когда флот Лизандра выходил из порта для того, чтобы напасть на афинян, на мачтах адмиральской галеры загорелись огни. Древние считали появление огней Эльма хорошим предзнаменованием.

Особенно часто свидетелями этого явления становятся альпинисты. Иногда даже не только металлические предметы, но и кончики волос на голове украшаются маленькими светящимися плюмажами. Если поднять руку, то по характерному жжению чувствуется, как из пальцев истекает электрический ток. Нередко ледорубы начинают гудеть подобно большому шмелю.

Огни святого Эльма не что иное, как форма коронного разряда, легко получаемого в лаборатории. Заряженное облако индуцирует на поверхности Земли под собой электрические заряды противоположного знака. Особенно большой заряд скапливается на остриях. Когда напряженность электрического поля достигнет критического значения 30 000 *в/см*, начинается разряд. Образовавшиеся возле острия вследствие обычной ионизации воздуха электроны ускоряются полем и, сталкиваясь с атомами и молекулами,



разрушают их. Число электронов и ионов лавинообразно растет, и воздух начинает светиться.

Электрический заряд Земли

Грозовое облако недолго хранит свой заряд. Несколько ударов молнии — и облако разряжается. Заряд земного шара, если не обращать внимание на незначительные колебания, остается неизменным. У поверхности Земли электрическое поле не так уж мало: 130 *в/м*. На первый взгляд это довольно странно. Из-за атмосферных ионов воздух проводит электрический ток, и расчеты показывают, что примерно за полчаса земной шар должен полностью разрядиться. Поэтому главная трудность не в выяснении происхождения заряда, а в том, чтобы понять, почему он не исчезает.

Существуют две причины восстановления заряда Земли. Во-первых, удары молний. За сутки на Земле происходит более 40 тысяч гроз и ежесекундно около 1800 молний бьют в Землю. Нижняя часть облака несет отрицательный заряд и, следовательно, удар молнии — это передача земному шару некоторой порции отрицательного электричества.

Одновременно во время грозы возникают токи с многочисленных остроконечных предметов (огни святого Эльма), которые отводят от земной поверхности положительный заряд.

Баланс здесь навести трудно, но в общем, по-видимому, концы с концами сходятся. Потеря отрицательного заряда участками земной поверхности, над которыми простирается чистое небо, компенсируется притоком отрицательных зарядов в местах, где свирепствуют грозы.

Ну, а откуда же взялся у Земли заряд, и почему он отрицательный? Здесь приходится строить догадки. По мысли Френкеля вначале небольшой заряд возник от случайных причин. Затем он начал расти за счет «грозового механизма», о котором шла речь, пока не установилось динамическое равновесие, существующее по сей день.

Заряд вначале мог бы быть положительным. Тогда водяные капли грозового облака поляризовались бы по-иному, и молнии сообщали бы Земле положительный заряд. В общем все было бы так, как и

сейчас, но только роли положительных и отрицательных зарядов переменились бы.

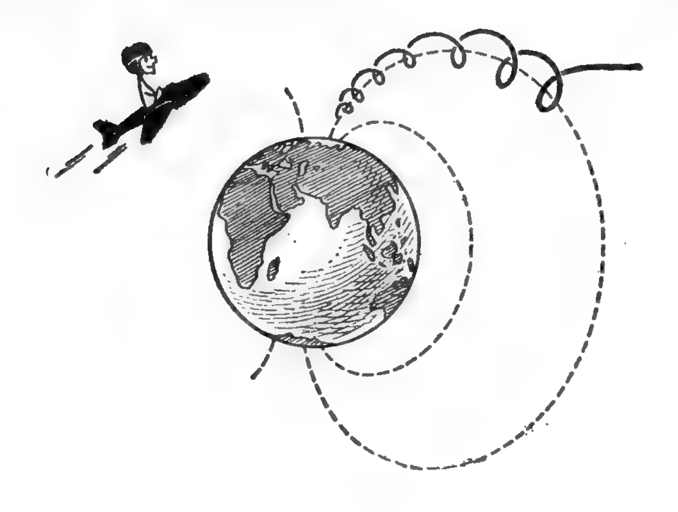
Земной магнетизм

Магнитное поле Земли гораздо раньше привлекло к себе внимание людей, чем электрическое. Обнаруживается оно крайне просто, но его роль в жизни нашей планеты далеко не сводится к тому, чтобы помочь ее обитателям находить с помощью компаса верный путь в безбрежном океане, тайге или пустыне.

Если электрическое поле практически не выходит за пределы нижних слоев атмосферы, то магнитное простирается на 20—25 земных радиусов. Лишь на высоте в 100 000 километров оно перестает играть заметную роль, приближаясь к величине поля межпланетного пространства.

Магнитное поле образует третий «броневой пояс», окружающий Землю наряду с атмосферой и ионосферой. Оно не подпускает к Земле потоки космических частиц, если только их энергия не слишком велика. Лишь в области магнитных полюсов эти частицы беспрепятственно могут вторгаться в атмосферу.

На большой высоте магнитное поле невелико, но захватывает громадные области пространства. Действуя на заряженную частицу длительное время,



оно значительно изменяет ее траекторию. Вместо прямой линии получается спираль, навивающаяся на силовые линии поля. Вдоль силовых линий магнитное поле гонит частицы к полюсам. Иногда, правда, если скорость частицы велика, она не успевает сделать даже одного витка, и тогда можно говорить лишь об искривлении траектории.

На летящую вдоль силовой линии частицу в соответствии с законом Ампера магнитное поле не действует. Вот почему частицы свободно могут подлетать к полюсам, откуда веером расходятся силовые линии. Не удивительно, что корпускулярные потоки от Солнца вызывают свечение верхних слоев воздушного океана преимущественно у полюсов.

Кстати, эти потоки частиц сами создают значительные магнитные поля и вызывают «магнитные бури», во время которых стрелка компаса начинает беспомощно метаться.

Радиационные пояса Земли, открытые сравнительно недавно с помощью космических ракет,— это не что иное, как заряженные частицы не слишком больших энергий, захваченные магнитной ловушкой, расставленной нашей планетой. Именно магнитное поле удерживает на большой высоте рои заряженных частиц, подобно ореолам окружающих Землю. Во внешнем поясе доминируют электроны, а во внутреннем, где напряженность поля больше,— протоны. Для полетов космонавтов на больших высотах эти пояса представляют реальную опасность.

Земной шар — сферическая динамомашина

Происхождение земного магнетизма — еще более запутанный вопрос, чем происхождение электрического поля. Его нельзя объяснить скоплением намагниченных пород. Интересная идея Френкеля, позволяет, по-видимому, здесь кое-что понять. Земное ядро — это генератор электрического тока, действующий по принципу самовозбуждения, как и обычная динамомашина.

Вам, вероятно, нетрудно будет вспомнить, в чем состоит этот принцип. В динамомашинах ток возникает при движении проводников в магнитном поле, которое само создается этим же током. Если вначале

тока нет, то при некоторой скорости вращения он возникает и начнет нарастать. Ведь небольшое остаточное поле всегда есть. Оно создает ток, несколько увеличивающий магнитное поле. За счет этого возрастает ток, а затем и магнитное поле, и т. д., вплоть до некоторого предельного значения.

Чтобы можно было уподобить земной шар генератору, прежде всего надо допустить, что ядро Земли является жидким и способно проводить электрический ток. В этих предположениях нет ничего невероятного. Но откуда могут взяться движения проводящих масс ядра? У динамомашины мы просто раскручиваем якорь, а здесь нет никаких внешних воздействий.

Выход, однако, может быть найден. За счет радиоактивного распада неустойчивых элементов температура в центре ядра должна быть несколько выше, чем на его периферии. Из-за этого возникает конвекция: более горячие массы из центра ядра устремляются вверх, а холодные опускаются вниз. Но Земля вращается и скорость масс на поверхности ядра больше, чем в его глубинах. Поэтому поднимающиеся элементы жидкости тормозят вращение наружных слоев ядра, а опускающиеся, напротив, ускоряют внутренние слои. В результате внутренняя часть ядра вращается быстрее наружной и играет роль ротора генератора, в то время как наружная — роль статора.

В такой системе, как показывают расчеты, возможно самовозбуждение и появление вихревых электрических токов значительной величины.

Эти токи, согласно гипотезе Френкеля, создают магнитное поле вокруг Земли!

Энергия на поддержание тока черпается из радиоактивного разогрева вещества, создающего конвекционные токи в ядре.

Так ли обстоит дело в действительности, сказать трудно. Во всяком случае правильнее называть Землю «большой динамомашиной», чем «большим магнитом», как это делается во многих книгах.

Магнитное поле окружает не только Землю, но может существовать и у других планет и звезд. Оно ставит «свой штамп» на световые волны, излученные

атомами Солнца и звезд, давая тем самым физикам возможность обнаружить себя.

Луна, как показали измерения наших и американских ученых, не имеет магнитного поля, подобного земному. Но отдельные лунные породы заметно намагничены. Не имеют магнитного поля планеты Меркурий, Венера и Марс. Зато магнитное поле Юпитера довольно велико: оно примерно в 100 раз превышает магнитное поле Земли. О магнитном поле Сатурна, Урана, Нептуна и Плутона пока еще ничего не известно.

Космическая электродинамика

Заговорив о магнитных полях планет и звезд, мы незаметно вступили в новую область, область космической электродинамики. Здесь пока еще мало достоверного; гораздо меньше, чем различных гипотез. Но многое, что вчера еще было любопытной догадкой, сегодня становится почти достоверным фактом. Главное, выяснилось, что электромагнитные силы играют в космосе совсем не малую роль, как это предполагалось ранее.

Бушующая поверхность и атмосфера Солнца... Гигантские языки раскаленного вещества взмывают вверх. Вихри и смерчи размером с нашу планету. Бури, непрерывные бури, но огненные, сверкающие. Бури не только вещества, но и магнитного поля.

Иногда из глубин Солнца парами выплывают черные пятна. Магнитное поле в этих участках возрастает в тысячи раз.

Огромные силы порой выбрасывают из Солнца целые сгустки заряженных частиц. Преодолевая гравитационное притяжение, они со скоростью нескольких тысяч километров в секунду врезаются в атмосферу Земли.

Трудно здесь физику усмотреть какую-то закономерность, какой-то порядок. Трудно понять природу сил в крутящейся массе материи. Это происходит далеко, очень далеко, и совсем не похоже на то, что мы можем видеть на нашей планете.

Трудно, но не невозможно. При тех температурах, которые есть на Солнце, не может быть ни нейтральных атомов, ни нейтральных молекул. Они просто не могут уцелеть, как не может уцелеть паро-

воз, на полном ходу врезающийся во встречный поезд.

А такой полностью ионизированный газ, или полностью ионизированная плазма, как говорят физики, превосходно проводит электрический ток. Это дает возможность электромагнитным силам развернуться и демонстрировать свою мощь на новом поприще.

В магнитном поле внутри движущейся высокотемпературной плазмы возбуждаются электрические токи немалой величины. Из-за хорошей проводимости они не склонны затухать. Поэтому в среде наряду с обычными силами упругости приобретают не меньшее значение силы магнитного взаимодействия токов. И если движение простой среды описывается законами гидродинамики, то здесь царствует магнитная гидродинамика.

Мы еще, конечно, очень далеки от того, чтобы понять все, происходящее на Солнце. Но есть уверенность, что основные явления, начиная от выброса целых масс материи и кончая появлением солнечных пятен, обязаны магнитным взаимодействиям.

Да и не только это! Межзвездный газ сильно ионизирован излучением. Плотность его мала (1 частица на кубический сантиметр), но это компенсируется громадными размерами облаков. С электрическими токами и, соответственно, магнитными полями в них нельзя не считаться.

Движущиеся облака заполняют собой всю Галактику, и поэтому вся она оказывается наполненной магнитным полем. И даже не только сама Галактика, но и соседние области пространства.

Магнитные поля здесь невелики, и мы их непосредственно воспринимать не можем. Но мы знаем, что они есть! Откуда же?

Радиоизлучение Галактики и космические лучи

Если бы мы могли видеть радиоволны, то на небе сверкало бы не одно, а целых три Солнца (точнее, «радиосолнца»). Одно из них в созвездии Кассиопеи, другое — в Лебеде и, наконец, это наше обычное Солнце *). Но кроме

*) Солнце — рядовая звезда и только близость его к нам позволяет ему конкурировать по «радиояркости» с двумя первыми источниками, неизмеримо более мощными, чем Солнце.

того мы заметили бы множество менее ярких «радиосолнц» и слабый рассеянный «радиосвет», идущий к нам из всех уголков Галактики и даже из прилегающих к ней, казалось бы, пустых мест.

Часть радиоволн возникает при столкновениях заряженных частиц раскаленного газа. Это тепловое (тормозное) излучение. Оно ничего не может рассказать нам о магнитных полях Галактики. Но есть другая, нетепловая часть, колыбелью которой служит магнитное поле. Оно заворачивает быстрые космические электроны, и, крутясь по спирали, эти электроны излучают электромагнитные волны (синхротронное излучение), подобно тому как бешено вращающийся точильный камень рассыпает вокруг себя искры, если коснуться его поверхности лезвием ножа. Можно утверждать, что там, где рождаются радиоволны, обязательно есть магнитные поля!

Но откуда берутся в космосе быстрые электроны? Радиоизлучение рождено ими, и там, где находятся особо мощные источники радиоволн, мы должны искать космические ускорители. Значит, те далекие мощные «радиосолнца», о которых шла речь, и являются главным образом такими космическими ускорителями.

Мы привыкли к спокойной глубине чистого ночного неба. Ничто не кажется столь незыблемым, вечным, как «стройный хор» небесных светил. В общем-то так оно и есть. Но иногда происходят катастрофы; катастрофы чисто космических масштабов. Звезда, жившая миллиарды лет своей обычной жизнью, вдруг начинает по не вполне ясным причинам чудовищно распухать. (Если бы это случилось с нашим Солнцем *), то очень скоро орбиты всех планет оказались бы внутри него.) Яркость звезды (ее называют сверхновой) увеличивается в сотни миллионов раз, и ее можно видеть на небе среди бела дня. Постепенно блеск уменьшается, и на месте звезды остается туманное облако, иногда с трудом различимое в телескоп. В Галактике с ее миллиардами звезд такая вспышка наблюдается раз в 100—200 лет.

*) Солнцу подобный взрыв в действительности не угрожает. Его масса слишком мала.

С тех пор как изобрели телескоп, не появилось ни одной сверхновой.

Так вот, «радиосолнца» в большинстве своем это остатки сверхновых звезд. Однако наблюдаются следы еще более мощных катастроф — взрывов целых галактик или их ядер. Такие галактики, излучающие огромное количество энергии в радиодиапазоне, были названы *радиогалактиками*. Одна из них расположена в направлении созвездия Лебедя.

Можно себе представить, что первоначальное ускорение заряженные частицы (электроны, протоны и ядра атомов) получают от гигантской ударной волны, сопровождающей взрыв сверхновой. В дальнейшем начинают действовать электромагнитные силы. Нарастающие магнитные поля индуцируют электрическое поле. Это поле может быть не таким уж большим, но из-за своих космических размеров ускоряет отдельные частицы до энергий, недоступных пока для ускорителей, созданных руками человека. Основными источниками космических лучей по современным представлениям являются вспышки сверхновых.

Некоторую долю космических лучей поставляют менее мощные индукционные электрические поля Солнца и других звезд.

Беспорядочные магнитные поля Галактики рассеивают космические частицы. В результате на Землю они поступают равномерно со всех сторон, а не только из тех мест, где происходит их ускорение. Сверхмощные частицы залетают к нам, вероятно, из соседних галактик.

Мы не можем утверждать, что все в мире происходит так и только так, как мы вам только что рассказали. Это лишь наиболее естественная с современной точки зрения картина электромагнитных явлений во Вселенной. Написана она, можно заметить, весьма крупными мазками. И это получилось не только за счет того, что картина очень велика. Детали явлений остаются пока неясными для самих художников-ученых. Да и «краска» на картине еще «не просохла»: картина была создана не так давно, и лишь ее цельность вселяет надежду, что в основе своей она правильна.

Беседа соавторов

В то время как в космосе разыгрывались приличествующие ему величественные явления, в одной из московских квартир «маленький дружный коллектив» (так именовали себя авторы) раздирали противоречия. К моменту, когда работа над книгой уже шла полным ходом, авторам стало ясно, что их позиции, мягко говоря, не вполне совпадают.

Сущность спора, как ясно из дальнейшего, позволяет закрепить за одним из соавторов имя Кроткого (сокращенно К), а за другим — Строптивого (сокращенно С).

К. Ты знаешь, как я тебя уважаю! Но что ты делаешь?

Вместо того, чтобы непринужденно рассказывать о сущности сил, ты, превратившись в архивариуса, скрупулезно, с ненужными деталями регистрируешь все проявления электромагнитных сил, которые знаешь. Да еще выискиваешь в книгах описания проявлений сил, которых, извини меня, совсем не знаешь.

Об этом ли мечтал наш читатель, приобретая книгу? Что ты думаешь, ему нужен еще один учебник?

С. Прости меня, но поскольку книга не одобрена Министерством, это еще на учебник. И, кроме того, разве мы не обещали рассказать о силах в природе? Значит о силах, которые окружают каждого из нас. Нельзя, никак нельзя обойти трение, упругость, химические силы и т. д. Ведь мы пишем не для юных философов, желающих знать только основы основ и не интересующихся тем, что происходит вокруг нас, над нами и под нами каждый день.



К. Я верю, что у тебя прекрасные намерения. Но ведь если идти по твоему пути, то придется, например, говорить не только о трении в жидкостях вообще, но и о трении шарика, цилиндрика, кубика и т. д. Тогда все будет разложено по полочкам.

Я, конечно, немного преувеличиваю, но стремление к раскладыванию по полочкам у тебя, несомненно, есть.

С. Что же ты предлагаешь, поступить согласно старому анекдоту, в котором выучившийся сынок поражал родителей и всех окружающих крайним научным лаконизмом ответов? На все вопросы: что, как и почему, он бросал кратко — это электричество.

И нам что ли писать: упругость — это электричество; трение — тоже электричество; химические силы есть силы электрические и т. д.

К. А посмотри, что получилось у тебя. Здесь и строение газов вместе с жидкостями (которое известно всем), и особенности сил в кристаллах (которые мало кому известны, но зато не интересны почти никому)...

Хочешь все же о них написать — пиши. Но пиши так, чтобы читатель не заснул или не забросил книгу куда-нибудь подальше.

С. Да пойми же ты, что это трудно, очень трудно.

Интереснее и проще писать, например, о теории относительности, чем о химических силах. Да кроме того, о каждом типе электромагнитных сил надо писать целую книгу. Желая быть кратким, трудно не быть скучным.

К. Интереснее не только писать о теории относительности, о ней интереснее и читать.

Мне больно думать, что мой соавтор сознательно идет на то, чтобы быть скучным. Зачем? Существуют в конце концов энциклопедии, где каждый может прочесть все, что ему угодно.

С. Ну что же, пусть эта часть книги и будет энциклопедией, но энциклопедией, все же (льщу себя надеждой) более приспособленной для не слишком изнурительного чтения.

К. Я вижу, ты упорствуешь. А ведь в твоем рассказе, кроме всего прочего, нет даже элементарной

последовательности. После космических лучей ты сразу же хочешь перейти к электрическим рыбам.

С. Ну и что? Рыбы, так рыбы. Кто ими не интересуется, может не читать.

И вообще, современный читатель очень сообразителен. Он не будет читать книгу подряд, если в ней встречаются скучные места. Но и не бросит ее, если встречаются места интересные. На худой конец пусть не читает эту главу совсем.

К. Гм... поскольку ты так упрям, то ничего не поделаешь.

С. Ты не огорчайся особенно. Есть ведь еще редактор. Скажет: все это выбросить — выбросим.

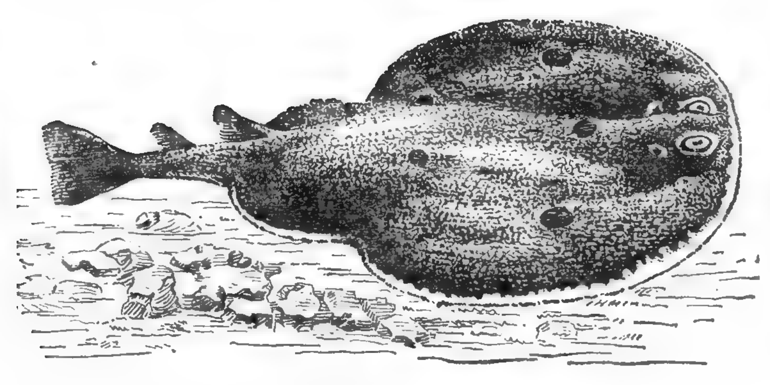
На том и порешили.

Электрические рыбы

Итак, электрические рыбы. Это уникальные существа, отличающиеся от своих собратьев тем, что несут на себе живые гальванические элементы. Вырабатываемый ими электрический ток служит средством защиты или нападения.

Интересно, что среди ископаемых рыб электрических было гораздо больше, чем среди здравствующих ныне. Видимо, явное использование электромагнитных сил оказалось не столь эффективным, как совершенствование сил, проявляющихся неявно: в первую очередь мышечных.

Наиболее ярким представителем интересующей нас породы является электрический скат. Рыба эта, обитающая в теплых морях, весит около 100 кило-



граммов и достигает около двух метров в длину. Его электрические органы, расположенные по бокам головы, весят больше пуда. Неутомленный скат способен дать ток в 8 ампер при напряжении в 300 вольт. Это представляет серьезную опасность для человека.

От электрических рыб трудно ожидать большой чувствительности к току. И действительно, скат легко переносит напряжения, смертельные для других рыб.

Электрические органы ската по своему строению до удивления походят на батарею гальванических элементов. Они состоят из многочисленных пластинок, собранных столбиками (последовательное соединение элементов), которые расположены друг возле друга во много рядов (параллельное соединение).

Одна сторона пластинки гладкая и несет на себе отрицательный заряд. Другая, с выступающими сосочками, заряжена положительно. Как и полагается, все устройство заключено в электроизолирующую ткань.

Мы не будем пытаться вникнуть в механизм возникновения электродвижущей силы в органах ската, как не разбирали в свое время принцип действия обычного гальванического элемента (последуем совету К). Здесь еще много неясного. С уверенностью можно утверждать лишь одно: в основе работы электрических органов лежат химические силы, как и в гальваническом элементе.

Не будем мы также расширять круг знакомств среди электрических рыб.

Нельзя только не упомянуть еще об одном замечательном обитателе Нила — мормирусе или водяном слонике. Эта рыба снабжена удивительным локатором. В основании хвоста у нее расположен генератор переменного электрического тока, посылающий импульсы с частотой нескольких сот колебаний в секунду. Окружающие предметы искажают электромагнитное поле вокруг мормируса, что немедленно отмечается приемным устройством на его спине. Чувствительность локатора необычайно велика. Мормируса нельзя поймать в сеть. В аквариуме он начинает метаться, как только вы проведете несколько раз расческой по волосам.

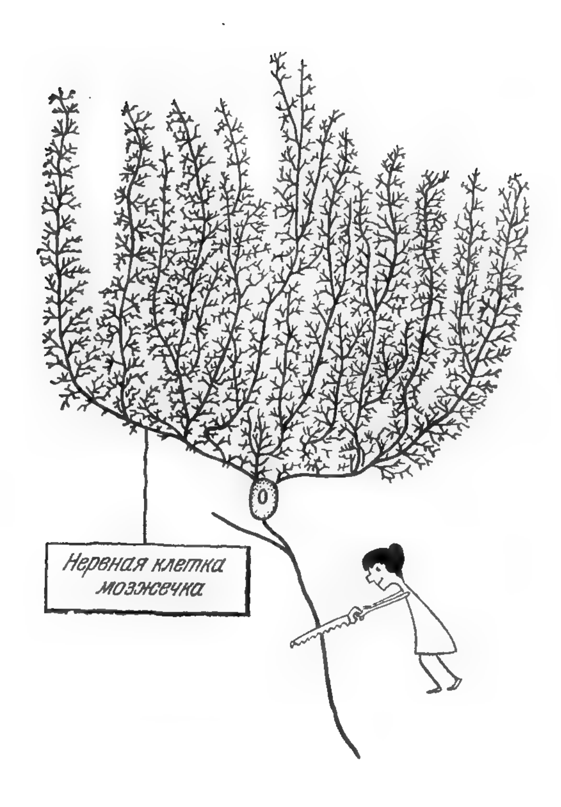
Природа нервного импульса

В конце концов скат и подобные ему рыбы со всем своим электрическим хозяйством — не более чем каприз природы. Свободному электричеству в живых организмах природа отвела несравненно более значительную роль. Это электричество обслуживает линии связи, передающие в мозг «телеграммы» от органов чувств обо всем, совершающемся во внешнем мире, и ответные приказания мозга любым мышцам и всем внутренним органам.

Нервы пронизывают все тело более или менее совершенных живых существ, и благодаря им организм выступает как единое целое, действующее подчас поразительно целесообразно. Стоит перерезать нерв, ведущий к какой-либо мышце, и она становится парализованной, подобно тому как перестает работать цилиндр мотора, если порвать провод, передающий импульсы тока запальной свече.

Это не просто внешняя аналогия. Еще со времен Гальвани было установлено, что передаваемый нервным волокнам сигнал (нервный импульс) представляет собой кратковременный электрический импульс. Правда, дело обстоит далеко не так просто, как можно подумать. Нерв не пассивный канал большой проводимости, как обыкновенная металлическая проволока. Скорее он напоминает то, что в технике называют релейной линией, когда поступающий сигнал передается только соседним участкам линии, где он усиливается и лишь затем скользит дальше, там снова усиливается и т. д. Благодаря этому сигнал может быть передан без ослабления на значительные расстояния, несмотря на естественное затухание.

Что же такое нерв? У Р. Джерарда можно прочесть: «Если паука, которого мы видим с земли висящим на паутинной нити на высоте шестиэтажного здания, уменьшить в размерах еще примерно раз в двадцать (включая нить, на которой он висит), он очень напоминал бы нервную клетку, или нейрон. Тело нервной клетки не отличается от других клеток ни своими размерами, ни какими-либо другими особенностями... Однако нейрон, в отличие от обычных,



нелюбопытных клеток, имеет не только клеточное тело — он рассылает для исследования отдаленных частей организма тонкие нитеподобные отростки. Большинство отростков распространяется на небольшие расстояния... Однако один тонкий отросток диаметром менее 0,01 миллиметра, точно одержимый страстью к странствованиям, отходит от нейрона на громадные расстояния, измеряемые сантиметрами и даже метрами.

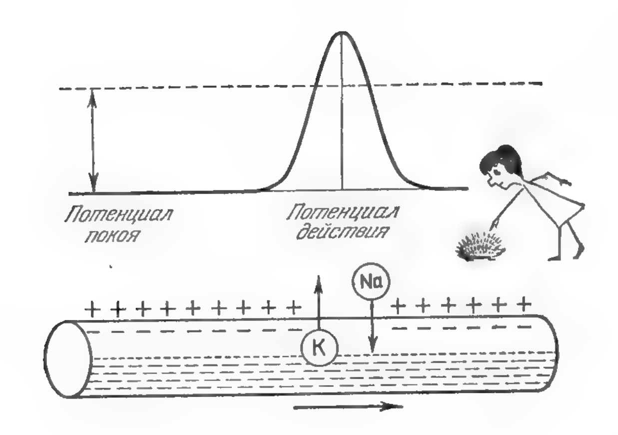
Все нейроны центральной нервной системы собраны вместе в головном и спинном мозгу, где они образуют серое вещество... И только длинные отростки — аксоны соединяют их с остальными частями тела. Пучки этих аксонов, или осевых отростков, отходящих от близких друг к другу нервных клеток,

образуют нервы». Особое вещество — миэлин окутывает тонким слоем большинство аксонов, подобно тому как изоляционная лента обматывает электрический провод.

Сам аксон можно упрощенно представить себе как длинную цилиндрическую трубку с поверхностной мембраной, разделяющей два водных раствора разного химического состава и разной концентрации. Мембрана подобна стенке с большим количеством полуоткрытых дверей, сквозь которые ионы растворов могут протискиваться только с большим трудом. Самое удивительное в том, что электрическое поле «притворяет эти дверцы», а с его ослаблением они открываются шире.

В состоянии бездействия внутри аксона находится избыток ионов калия; снаружи — ионов натрия. Отрицательные ионы сконцентрированы главным образом на внутренней поверхности мембраны и поэтому она заряжена отрицательно, а наружная поверхность — положительно.

При раздражении нерва происходит частичная деполяризация мембраны (уменьшение зарядов на ее поверхностях), что ведет к снижению электрического поля внутри нее. Вследствие этого «приоткрываются дверцы» для ионов натрия и они начинают проникать внутрь волокна. В конце концов происходит местная деполяризация мембраны.



Глаза закрыты *Глаза открыты* *Глаза закрыты*

50 мв



Так возникает нервный импульс. Собственно говоря, это импульс напряжения *), вызванный протеканием тока через мембрану.

В этот момент «приоткрываются дверцы» для калиевых ионов. Проходя на поверхность аксона, они постепенно восстанавливают то напряжение (около 0,05 вольта), которое было у невозбужденного нерва.

При деполяризации участка мембраны появляется электрический ток, направленный от неактивных пока участков мембраны к деполяризованному участку. В результате возникает новый деполяризованный участок, который, в свою очередь, возбуждает процессы в соседнем участке и т. д. Самовоспроизводящееся состояние деполяризации начнет распространяться по первому волокну, не затухая, со скоростью около 120 метров в секунду. Это и есть скорость движения нервного импульса.

Ионы натрия и калия, смещенные при прохождении импульса со своих насиженных мест, постепенно возвращаются обратно непосредственно сквозь стенку за счет химических процессов, механизм которых пока еще не выяснен.

Вызывает восхищенное удивление, что все поведение высших животных, все творческие усилия человеческого мозга основаны в конечном счете на этих чрезвычайно слабых токах и тончайших, микроскопических химических реакциях.

*) Мы надеемся, что все более или менее представляют себе, что такое напряжение в электрической сети. Здесь слово напряжение имеет точно такой же смысл.

Биотоки мозга

Здесь мы касаемся святая-святых живой природы — человеческого мозга. В мозгу непрерывно совершаются электрические процессы. Если на лоб и затылок наложить металлические пластины, соединенные через усилитель с регистрирующим прибором, то можно зафиксировать непрерывные электрические колебания коры головного мозга *). Их ритм, форма и интенсивность существенно зависят от состояния человека.

В мозгу сидящего спокойно с закрытыми глазами, не думающего ни о чем человека совершается около 10 колебаний в секунду (так называемые альфа-волны). Когда человек открывает глаза, альфа-волны исчезают и появляются более быстрые нерегулярные колебания.

Когда человек засыпает, ритм альфа-волн замедляется, а амплитуда их нарастает. Во время сновидения характер колебаний несколько изменяется, что позволяет довольно точно определить момент начала и конца сновидения.

При заболеваниях мозга характер электрических колебаний меняется особенно резко. Так, патологические колебания при эпилепсии могут служить верным признаком заболевания.

Все это доказывает, что мозговые клетки находятся в состоянии постоянной активности, и большие количества их «колеблются вместе, подобно скрипкам огромного оркестра». Поступающие в мозг нервные импульсы не идут проторенными путями, а меняют всю картину распределения колебаний в коре больших полушарий.

Характер электрической активности мозга меняется с возрастом в течение всей жизни и обучения.

Надо полагать, что электрические колебания не просто сопутствуют работе мозга, как шум — движению автомобиля, а являются существеннейшим моментом всей его жизнедеятельности. У электронной вычислительной машины, способной выполнять отдельные функции мозга даже лучше, чем он сам,

*) Колебания наблюдаются не только в мозгу человека, но и в мозгу животных.

именно электромагнитные процессы определяют всю работу.

Нужно подчеркнуть, что каждому ощущению, каждой мысли отнюдь не соответствует свое собственное, определенное колебание. О чем думает человек, по форме электрических колебаний определить нельзя.

Какие функции выполняют эти процессы в мозгу, мы пока не знаем. Но они отчетливо показывают, что материальной основой мышления являются электромагнитные процессы в наиболее высокоорганизованной материи, которую создала природа на нашей планете.

5.

Солнечные лучи

«Дороги мне клейкие, распускающиеся весной листочки, дорого голубое небо»,— говорил Иван Карамазов, один из самых мрачных героев, порожденных гением Достоевского.

Солнечный свет всегда был и остается для человека символом вечной юности, всего лучшего, что может быть в жизни. Чувствуется взволнованная радость человека, живущего под Солнцем, и в первом стихотворении четырехлетнего мальчика:

Пусть всегда будет Солнце
Пусть всегда будет небо,
Пусть всегда будет мама,
Пусть всегда буду я!

и в четверостишьи замечательного поэта Дмитрия Кедрина:

Ты говоришь, что наш огонь погас.
Твердишь, что мы состарились с тобою,
Взгляни ж, как блещет небо голубое!
А ведь оно куда старее нас...

Темное царство, царство мрака — это не просто отсутствие света, а символ всего тяжелого, гнетущего душу человека.

Поклонение Солнцу — древнейший и прекраснейший культ человечества. Это сказочный бог Кон-Тики перуанцев, это божество древних египтян — Ра. На самой заре своего существования люди смогли понять, что Солнце — это жизнь. Мы уже давно знаем, что Солнце — не божество, а раскаленный шар, но благоговейное отношение к нему останется у человечества навсегда.



Даже физик, привыкший иметь дело с точной регистрацией явлений, испытывает такое чувство, будто бы он совершает кощунство, говоря, что свет Солнца — это электромагнитные волны определенной длины и ничего больше. Но это именно так, и мы с вами должны в нашей книге стараться говорить только об этом.

Как свет мы воспринимаем электромагнитные волны с длиной волны от 0,00004 сантиметра до 0,000072 сантиметра. Другие волны не вызывают зрительных впечатлений.

Длина световой волны очень мала. Представьте себе среднюю морскую волну, которая увеличилась настолько, что заняла одна весь Атлантический океан от Нью-Йорка в Америке до Лиссабона в Европе. Длина световой волны в том же увеличении лишь ненамного превысила бы ширину этой страницы.

Глаз и электромагнитные волны

Но мы прекрасно знаем, что есть электромагнитные волны совершенно иной длины волны. Есть километровые волны; есть и более короткие, чем видимый свет: ультрафиолет, рентгеновские лучи и др. Почему же природа сделала наш глаз (равно как и глаза животных) чувствительным именно к определенному, сравнительно узкому, интервалу длин волн?

На шкале электромагнитных волн видимый свет занимает крохотную полоску, зажатую между ульт-

рафиолетом и инфракрасными лучами. По краям простираются широкие полосы радиоволн и гамма-лучей, испускаемых атомными ядрами.

Все эти волны несут энергию, и, казалось бы, могли бы с тем же успехом делать для нас то, что делает свет. Глаз мог бы быть чувствительным к ним.

Конечно, сразу же можно сказать, что подходят не все длины волн. Гамма-лучи и рентген излучаются заметно лишь при особых обстоятельствах, и вокруг нас их почти что нет. Да это и «слава богу». Они (особенно это относится к гамма-лучам) вызывают лучевую болезнь, так что человечество не долго могло бы наслаждаться картиной мира в гамма-лучах.

Длинные радиоволны были бы крайне неудобны. Они свободно огибают предметы метровой величины, подобно тому как морские волны огибают выступающие прибрежные камни, и мы не могли бы рассматривать предметы, видеть которые четко нам жизненно необходимо. Огибание волнами препятствий (дифракция) привело бы к тому, что мы видели бы мир «как рыба в тине».

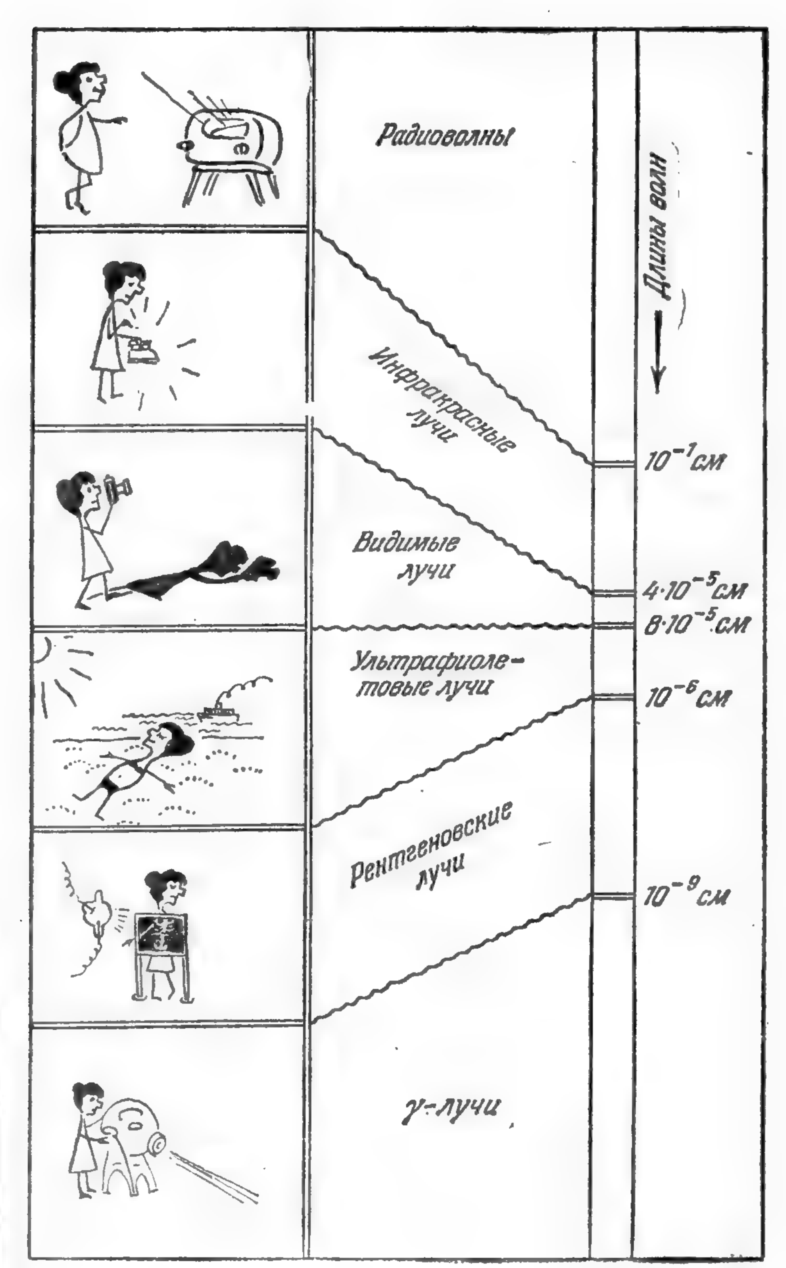
Но есть еще инфракрасные (тепловые) лучи, способные нагревать тела, но невидимые нами. Они, казалось бы, с успехом могли бы заменить те длины волн, которые воспринимает глаз. Или, наконец, глаз мог бы приспособиться к ультрафиолету.

Что же, выбор узкой полоски длин волн, которую мы именуем видимым светом, именно на данном участке шкалы, совершенно случаен? Ведь Солнце испускает как видимый свет, так и ультрафиолетовые и инфракрасные лучи.

Нет и нет! Здесь далеко не случай. Прежде всего, максимум излучения электромагнитных волн Солнцем лежит как раз в желто-зеленой области видимого спектра. Но не это все же главное! Достаточно интенсивным будет излучение и в соседних областях спектра.

«Окна» в атмосфере

Мы живем на дне воздушного океана. Земля окружена атмосферой. Мы ее считаем прозрачной или почти прозрачной. И она является таковой в действительности, но только для узкого участка длин волн (узкого участка спектра,


Радиоволны
Инфракрасные лучи
Видимые лучи
Ультрафиолетовые лучи
Рентгеновские лучи
γ-лучи
Длины волн
10^{-1} см
$4 \cdot 10^{-5}$ см
$8 \cdot 10^{-5}$ см
10^{-6} см
10^{-9} см



как говорят в подобном случае физики), который как раз воспринимает наш глаз.

Это первое, оптическое «окно» в атмосфере. Кислород сильно поглощает ультрафиолет. Пары воды задерживают инфракрасное излучение. Длинные радиоволны отбрасываются назад, отражаясь от ионосферы.

Имеется еще только одно «радиоокно», прозрачное для волн от 0,25 сантиметра до примерно 30 метров. Но эти волны, как уже говорилось, плохо подходят для глаза, да и интенсивность их в солнечном спектре очень уж мала. Потребовался большой скачок в развитии радиотехники, вызванный усовершенствованием радиолокаторов во время второй мировой войны, чтобы научились уверенно улавливать эти волны.

Таким образом, в процессе борьбы за существование живые организмы приобрели орган, реагирующий как раз на те излучения, которые были наиболее интенсивны и очень хорошо подходили для своего назначения.

То, что максимум излучения Солнца точно приходится на середину «оптического окна», следует, вероятно, считать дополнительным подарком природы. (Природа вообще оказалась исключительно щедрой по отношению к нашей планете. Можно сказать, что она сделала все, или почти все, от нее зависящее, чтобы мы могли рождаться и жить счастливо. Она, конечно, не могла «предусмотреть» всех последствий своей щедрости, но дала нам разум и тем самым сделала ответственными нас самих за свою дальнейшую судьбу.) Без поразительного совпадения максимума излучения Солнца с максимумом прозрачности атмосферы можно было бы, вероятно, обойтись. Лучи Солнца рано или поздно все равно

пробудили бы жизнь на Земле и смогли бы поддерживать ее в дальнейшем.

Голубое небо

Если вы читаете эту книгу не как пособие для самообразования, которое жалко бросать, поскольку уже затрачены время и деньги, а «с чувством, толком, расстановкой», то вы должны обратить внимание на очевидное, казалось бы, противоречие. Максимум излучения Солнца приходится на желто-зеленую часть спектра, а видим мы его желтым.

Виновата атмосфера. Она лучше пропускает длинноволновую часть спектра (желтую) и хуже коротковолновую. Поэтому зеленый свет оказывается сильно ослабленным.

Короткие длины волн вообще рассеиваются атмосферой во все стороны особенно интенсивно. Поэтому над нами «блещет небо голубое», а не желтое или красное. Не будь атмосферы совсем, не было бы над нами и привычного неба. Вместо него — черная бездна с ослепительным Солнцем. Пока это видели только космонавты.

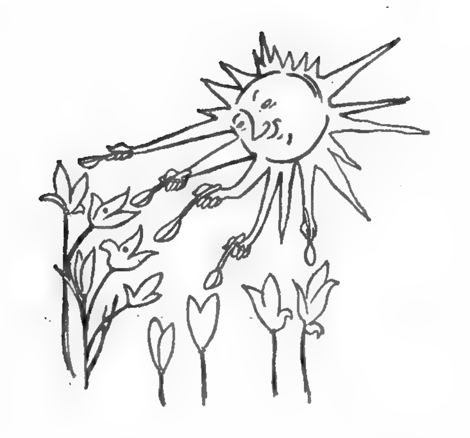
Такое Солнце без защитной одежды губительно. Высоко в горах, когда есть еще чем дышать, Солнце становится невыносимо жгучим *): нельзя оставаться без одежды, а на снегу — без темных очков. Можно обжечь кожу и сетчатку глаз.

Дары Солнца

Световые волны, падающие на Землю,— бесценный дар природы. Прежде всего, они дают тепло, а с ним и жизнь. Без них космический холод сковал бы Землю. Если бы количество всей энергии, потребляемой человечеством (топливо, падающая вода и ветер), увеличилось в 30 раз, то и тогда это составило бы всего лишь тысячную долю той энергии, которую бесплатно и без всяких хлопот поставляет нам Солнце.

К тому же главные виды топлива — каменный уголь и нефть — не что иное, как «консервированные солнечные лучи». Это остатки растительности, буйным цветом покрывавшей когда-то нашу планету, а возможно, отчасти, и животного мира.

*) Ультрафиолетовое излучение верхними слоями атмосферы поглощается недостаточно.



Вода в турбинах электростанций была когда-то в виде пара поднята вверх энергией солнечных лучей. Именно солнечные лучи приводят в движение воздушные массы в нашей атмосфере.

Но это еще не все. Световые волны не только нагревают. Они пробуждают в веществе химическую активность, которую не способен вызвать простой нагрев. Выцветание тканей и загар — это результат химических реакций.

Важнейшие же реакции идут в «клейких весенних листочках», равно как, впрочем, в иглах хвои, листьях травы, деревьев и во многих микроорганизмах. В зеленом листе под Солнцем происходят необходимые для всей жизни на Земле процессы. Они дают нам пищу, они же дают нам кислород для дыхания.

Наш организм, подобно организмам других высших животных, не способен соединять чистые химические элементы в сложные цепи атомов — молекулы органических веществ. Наше дыхание непрерывно отравляет атмосферу. Потребляя жизненно необходимый кислород, мы выдыхаем углекислый газ (CO_2), связываем кислород и делаем воздух непригодным для дыхания. Его нужно непрерывно очищать. Это делают за нас растения на суше и микроорганизмы в океанах.

Листья поглощают из воздуха углекислый газ и расщепляют его молекулы на составные части: углерод и кислород. Углерод идет на постройку живых тканей растения, а чистый кислород возвращается в воздух. Пристраивая к углеродной цепочке атомы других элементов, извлекаемых корнями из земли, растения строят молекулы белков, жиров и углеводов: пищу для нас и для животных.

Все это происходит за счет энергии солнечных лучей. Причем здесь особенно важна не только сама энергия, а та форма, в которой она поступает. Фотосинтез (так называют этот процесс ученые) может протекать только под действием электромагнитных волн в определенном интервале спектра.

Мы не будем делать попыток рассказать о механизме фотосинтеза. Он не выяснен еще до конца. Когда это случится, для человечества, вероятно, наступит новая эра. Белки и другие органические вещества можно будет выращивать прямо в ретортах под голубым небосводом.

Давление света

Тончайшие химические реакции порождает свет. Одновременно он оказывается способным на простые механические деяния. Он давит на окружающие тела. Правда, и здесь свет проявляет известную деликатность. Световое давление очень невелико. На квадратный метр земной поверхности в ясный солнечный день приходится сила всего лишь около половины миллиграмма.

На весь земной шар действует довольно значительная сила, около 60 000 тонн, но она ничтожно мала по сравнению с гравитационной силой (в 10^{14} раз меньше).

Поэтому для обнаружения светового давления понадобился громадный талант П. Н. Лебедева. Им было измерено в начале нашего века давление не только на твердые тела, но и на газы.

Несмотря на то, что световое давление очень мало, действие его может привести к заметным эффектам.

Интересный случай произошел с американским спутником «Эхо». После выхода спутника на орбиту сжатым газом была наполнена большая полиэтиленовая оболочка. Образовался легкий шар диаметром около 30 метров. Неожиданно выяснилось, что за один оборот давлением солнечных лучей он смещается с орбиты на 5 метров. В результате вместо 20 лет, как было запланировано, спутник удержался на орбите меньше года.

Внутри звезд при температуре в несколько миллионов градусов давление электромагнитных волн должно достигать громадной величины. Надо пола-

гать, что оно наряду с гравитационными силами и обычным давлением играет существенную роль во внутризвездных процессах.

Механизм возникновения светового давления сравнительно прост, и мы можем сказать о нем несколько слов. Электрическое поле падающей на вещество электромагнитной волны раскачивает электроны. Они начинают колебаться в поперечном направлении к направлению распространения волны. Но это еще само по себе не вызывает давления.

На пришедшие в движение электроны начинает действовать магнитное поле волны. Оно-то как раз и толкает электроны вдоль светового луча, что и приводит в конечном счете к появлению давления на кусок вещества в целом.

Вестники далеких миров

Мы знаем, как велики безграничные просторы Вселенной, в которой наша Галактика — это рядовое скопление звезд, а Солнце — типичная звезда, принадлежащая к числу желтых карликов. Лишь внутри солнечной системы обнаруживается привилегированное положение земного шара. Земля наиболее пригодна для жизни среди всех планет солнечной системы.

Нам известно не только расположение бесчисленных звездных миров, но и их состав. Они построены из тех же самых атомов, что и наша Земля. Мир един.

Свет является вестником далеких миров. Он источник жизни, он же источник наших знаний о Вселенной. «Как велик и прекрасен мир»,— говорят нам приходящие на Землю электромагнитные волны. «Говорят» только электромагнитные волны — гравитационные поля не дают сколько-нибудь равноценной информации о Вселенной.

Звезды и звездные скопления можно видеть простым глазом или в телескоп. Но откуда мы знаем, из чего они состоят? Здесь на помощь глазу приходит спектральный аппарат, «сортирующий» световые волны по длинам и рассылающий их по разным направлениям.

Нагретые твердые или жидкие тела испускают непрерывный спектр, т. е. всевозможные длины волн,

начиная от длинных инфракрасных и кончая короткими ультрафиолетовыми.

Совсем иное дело изолированные или почти изолированные атомы раскаленных паров вещества. Их спектр — это частокол цветных линий разной яркости, разделенных широкими темными полосами. Каждой цветной линии соответствует электромагнитная волна определенной длины *).

Самое главное: атомы любого химического элемента дают свой спектр, непохожий на спектры атомов других элементов. Подобно отпечаткам пальцев у людей, линейчатые спектры атомов имеют неповторимую индивидуальность. Неповторимость узоров на коже пальца помогает найти преступника. Точно так же индивидуальность спектра дает в руки физиков возможность определить химический состав тела, не прикасаясь к нему, и не только тогда, когда оно лежит рядом, но и тогда, когда удалено на расстояния, которые даже свет проходит за миллионы лет. Надо лишь, чтобы тело ярко светилось **).

Те элементы, которые есть на Земле, были «найдены» также на Солнце и звездах. Гелий был даже раньше обнаружен на Солнце и уже затем найден на Земле.

Если излучающие атомы находятся в магнитном поле, то их спектр существенно меняется. Отдельные цветные полоски расщепляются на несколько линий. Именно это позволяет обнаружить магнитное поле звезд и оценить его величину.

Звезды так далеки, что мы не можем непосредственно заметить, движутся они или нет. Но приходящие от них световые волны приносят нам и эти сведения. Зависимость длины волны от скорости движения источника (эффект Допплера, о котором

*) Заметим, кстати, что вне нас в природе нет никаких красок, есть лишь волны различной длины.

**) Химический состав Солнца и звезд определяется, собственно говоря, не по спектрам испускания, ибо это непрерывный спектр плотной фотосферы, а по спектрам поглощения атмосферой Солнца. Пары вещества поглощают наиболее интенсивно как раз те длины волн, которые они испускают в раскаленном состоянии. Темные линии поглощения на фоне непрерывного спектра позволяют установить состав небесных светил.

уже упоминалось ранее) позволяет судить не только о скоростях звезд, но и об их вращении.

Основная информация о Вселенной поступала к нам ранее через «оптическое окно» в атмосфере. С развитием радиоастрономии все больше и больше новых сведений о Галактике поступает также и через «радиоокно».

Теперь появилась возможность размещения аппаратуры, чувствительной к высокочастотным излучениям, на орбитальных космических станциях. Благодаря этому было открыто более ста «рентгеновских» звезд, которые испускают рентгеновские лучи. Кроме того, рентгеновские лучи испускают оболочки сверхновых звезд (например, Крабовидная туманность, возникшая в результате вспышки Сверхновой в 1054 г.), а также квазары и некоторые галактики.

В начале 70-х годов с помощью нескольких американских спутников «Вела», одновременно находящихся на орбитах, были обнаружены всплески гамма-лучей с продолжительностью от долей секунды до десятков секунд.

Откуда берутся электромагнитные волны

Мы знаем, или думаем, что знаем, как происходит рождение радиоволн во Вселенной. Один из источников излучения был упомянут ранее вскользь: тепловое излучение, возникающее при торможении сталкивающихся заряженных частиц. Большой интерес представляет нетепловое радиоизлучение.

Видимый свет, инфракрасные и ультрафиолетовые лучи имеют преимущественно тепловое происхождение. Высокая температура Солнца и других звезд — главная причина рождения электромагнитных волн. Звезды излучают также радиоволны, но интенсивность их обычно мала.

Рентгеновское излучение имеет тепловое происхождение или же является синхротронным. Крабовидная туманность излучает рентгеновские лучи вследствие быстрого вращения релятивистских электронов в сильном магнитном поле. Происхождение всплесков гамма-излучения еще не выяснено. Коротковолновое излучение: гамма- и рентгеновские лучи, рождаются также при столкновениях заряженных частиц

космических лучей с атомами земной атмосферы. Правда, рождаясь в верхних слоях атмосферы, они почти целиком поглощаются, проходя сквозь ее толщу, и не доходят до поверхности Земли.

Радиоактивный распад атомных ядер — главный поставщик гамма-лучей у поверхности Земли. Здесь энергия черпается из самой богатой «энергетической кладовой» природы — атомного ядра.

Излучают электромагнитные волны и все живые существа. Прежде всего, как и любое нагретое тело,— инфракрасные лучи. Отдельные насекомые (например, светлячки) и глубоководные рыбы испускают видимый свет. Здесь он рождается за счет химических реакций в светящихся органах (холодный свет).

Наконец, при химических реакциях, связанных с делением клеток растительных и животных тканей, излучается ультрафиолет. Это так называемые митогенетические лучи, открытые советским ученым Гурвичем. Одно время казалось, что они имеют большое значение в жизнедеятельности клеток, но впоследствии более точные опыты, насколько можно судить, породили здесь ряд сомнений.

Знаменательное «облачко»

Читатель, который на протяжении всей этой длинной главы уже, вероятно, устал удивляться бесконечному разнообразию проявлений электромагнетизма, мог бы прийти к выводу, что нет на свете более благополучной теории, чем эта. Правда, некоторая заминка получилась при разговоре о строении атома. В остальном же электродинамика кажется безупречной и неуязвимой.

Такое ощущение огромного благополучия возникло у физиков в конце прошлого века, когда строение атома еще не было известно. Это ощущение было настолько полным, что знаменитый английский физик Томсон на рубеже двух веков имел, казалось, основание говорить о безоблачном научном горизонте, на котором его взор усматривал только два «маленьких облачка». Речь шла об опытах Майкельсона по измерению скорости света и о проблеме теплоемкости — классическая теория не могла объяснить, почему теплоемкость изменяется в зависимости от температуры. К этому по праву можно было бы до-



бавить и еще одно «облачко» — проблему теплового излучения. Для объяснения опытов Майкельсона потребовалось создание специальной теории относительности. Не менее радикальный пересмотр физических представлений оказался необходимым и для решения двух других проблем — здесь удалось добиться успеха только после возникновения квантовой теории. О тепловом излучении мы поговорим подробнее.

Физиков не удивляло, что все нагретые тела излучают электромагнитные волны. Нужно было только научиться количественно описывать это явление, опираясь на стройную систему максвелловских уравнений и законы механики Ньютона. Решая эту задачу, Рэлей и Джинс получили удивительный и парадоксальный результат. Из теории с полной непреложностью следовало, например, что даже человеческое тело с температурой 36,6°С должно было бы ослепительно сверкать, неминуемо теряя при этом энергию и быстро охлаждаясь почти до абсолютного нуля.

Здесь не надо никаких тонких экспериментов, чтобы убедиться в явном конфликте теории с действительностью. И вместе с тем, повторяем, вычисления Рэлея и Джинса не вызывали никаких сомнений. Они были прямым следствием самых общих утверждений теории. Никакие ухищрения не могли спасти положение.

То, что многократно проверенные законы электромагнетизма забастовали, как только их попытались применить к проблеме излучения коротких электромагнитных волн, настолько ошеломило физиков, что они стали говорить об «ультрафиолетовой катастрофе» *). Однако многим физикам в то время

*) «Катастрофа» была названа ультрафиолетовой, так как неприятности были связаны с излучением очень коротких волн.

еще казалось, что проблема теплового излучения — маленький частный вопрос, не существенный на фоне общих гигантских достижений.

Однако этому «облачку» суждено было разрастаться и, превратившись в гигантскую тучу, заслонив весь научный горизонт, пролиться невиданным ливнем, который размыл весь фундамент классической физики. Но одновременно он же вызвал к жизни новое физическое миропонимание, которое мы сейчас кратко обозначаем двумя словами — «квантовая теория».

Прежде чем рассказывать о том новом, что в значительной мере перевернуло наши представления как об электромагнитных силах, так и о силах вообще, обратим наш взор назад и попробуем с той высоты, на которую мы поднялись, отчетливо представить себе, почему же электромагнитные силы играют в природе столь выдающуюся роль.

6.

Почему две самые крупные главы в книге посвящены описанию электромагнитных сил?

Очевидно, потому, что электромагнитные силы наиболее распространены в природе.

Яркий и, возможно, несколько сумбурный калейдоскоп настоящей главы — неоспоримое тому свидетельство.

Но в чем причина необычайного разнообразия проявлений электромагнитных сил? Почему природа предоставила им самую широкую арену деятельности? Ответ на второй вопрос отчасти содержится в постановке первого. Разнообразие форм электромагнитных взаимодействий, конечно, способствует участию их в самых различных процессах живой и неживой природы.

Мы не собираемся сейчас рассказывать вам что-либо новое. На основе прочитанного можно самому ответить на поставленные вопросы. Отложите книгу

на минутку и подумайте прежде всего над причиной разнообразия электромагнитных сил.

Подумали? Теперь посмотрите, все ли вы учли.

Наличие зарядов двух видов, положительных и отрицательных,— очевидно, один из важнейших факторов разнообразия сил. Благодаря этому возможно как притяжение, так и отталкивание. Если положительный заряд равен отрицательному, то тела не обнаруживают взаимодействия на сколько-нибудь значительных расстояниях. Электромагнитные силы, дальнодействующие по своей природе, могут быть и короткодействующими.

Другой фактор, который нельзя игнорировать, это относительная сложность законов электромагнитных взаимодействий.

В отличие от сил тяготения, электромагнитные силы *зависят не только от расстояния между зарядами, но и от скоростей их движений.* Существует особое магнитное взаимодействие, не имеющее аналога в ньютоновской теории тяготения.

И наконец, при ускорении заряженного тела образуются электромагнитные волны. *Взаимодействие зависит от ускорений.*

Однако разнообразие проявлений электромагнитного поля мало бы чего стоило, если бы все тела не были построены из электрически заряженных частиц. *Важнейшие составные части атома — ядро и электроны — несут на себе электрический заряд.*

Гравитационный заряд (масса) присущ всем частицам без исключения, но силы тяготения крайне слабы и совершенно не способны конкурировать внутри кусков вещества с мощными электромагнитными силами.

Еще большей интенсивностью обладают ядерные взаимодействия. Однако они способны работать только на кратчайших расстояниях. Электромагнитные силы даже между нейтральными системами несравненно превосходят ядерные в отношении дальнодействия, а силы между заряженными телами будут дальнодействующими не в меньшей мере, чем силы всемирного тяготения. Еще медленнее убывают с расстоянием взаимодействия, осуществляемые посредством электромагнитных волн.

Перечисленных причин достаточно для того, чтобы сделать электромагнитные силы самыми «ходовыми» силами природы.

7.

Окончание этой главы мы назвали вставкой, у которой есть все права быть главой. Да, так оно и есть, эту вставку, если быть педантичным, нужно было бы превратить в отдельную главу (а, может быть, целую книгу) и поставить эту главу перед всеми остальными. Ведь речь пойдет о законах, царящих в мире элементарных частиц, из которых слагаются все окружающие нас вещи. Законы взаимодействия этих частиц и определяют, в конечном итоге, «силы в природе», о которых мы рассказываем. И если мы все же решили не начинать с такой главы и заменили такую главу скромной вставкой, то сделали это по многим причинам: путь от сложного к простому далеко не всегда наилучший; изучение математики начинается с арифметики, а не с интегралов; зачем отпугивать читателя с самого начала; и т. д.; и т. д.; и, наконец, так ли уж хорошо быть педантичным?

Было и еще одно немаловажное соображение. Оценить физическую идею можно в полной мере лишь тогда, когда понятна внутренняя логика ее появления, ее место в общей цепи познания законов природы.

И вот сейчас, закончив рассказ об электромагнитных силах в их классическом истолковании, мы можем сказать: перед тем, как продолжать рассказ о силах в природе, нам необходимо открыть новую дверь, за которой начинается та область, удивительная и порой парадоксальная, которая зовется *микромир*.

Прерывное в непрерывном

В науке есть свой символизм. Слово «квант» родилось или, лучше сказать, получило гражданство в науке вместе с XX веком. И любому, кого интересует «биография идей», история его рождения не может не показаться волнующей и даже трагичной.



Макс Планк был уже вполне зрелым ученым, когда его привлекла проблема излучения электромагнитных волн нагретыми телами. Формирование Планка, как и других ученых его поколения, протекало целиком под влиянием той величественной и, казалось, вполне законченной картины мира, которая именуется классической физикой. Здесь прочным фундаментом было ньютоновское понимание движения, и даже бурное развитие теории электромагнитного поля не внесло коренных изменений в его гармоничность и законченность.

Но наука сама является непрерывным движением. В ней самой вызревают силы, опрокидывающие любые «законченные» теории. Руками Макса Планка, классика в самом широком смысле этого слова, была пробита первая брешь в бастионе классической физики *). Брешь, которой суждено было расширяться и через которую хлынул вскоре такой поток новых идей, которого сам Планк не мог предвидеть. Он, по-видимому, до самого конца своей долгой жизни так и не смог полностью с этими идеями примириться.

Но в чем же состояло открытие Планка?

Вы помните, что совершенно неожиданно для физиков самая, казалось, строгая теория теплового излучения приводила к явно нелепым результатам вроде того, что человеческое тело должно ярко светиться. В поисках устранения этого вопиющего несоответствия между опытом и теорией Планк показал, что все трудности исчезают, если только предположить, что атомы испускают электромагнитную энергию отдельными порциями, которые были названы *квантами*. Заметьте, что из классической максвелловской электродинамики эти «порции» никак не вытекали. Больше того, они были для нее совершенно инородным телом.

*) Работы Планка по теории излучения появились в 1900 г. Теория относительности была создана в 1905 г.



Огромная заслуга Планка состояла в том, что он первым понял необходимость сделать *логический скачок*, принять предположение, *противоречащее* электродинамике Максвелла, чтобы добиться объяснения опытных фактов. Нужно в каком-то пункте пойти вразрез с классической теорией. Может быть, что-то во взаимодействии света с зарядами или в самих законах, управляющих электромагнитными волнами, было неточно? Планк не знал. Он установил факт. Объяснить его он не умел. А события развивались бурно.

Из того факта, что свет излучается порциями, еще не вытекает прерывистая структура самого светового луча. «Если пиво всегда продают в бутылках, содержащих пинту,— говорил Эйнштейн,— отсюда вовсе не следует, что пиво состоит из неделимых частей, равных пинте». Однако эксперименты по вырыванию светом электронов из вещества настойчиво указывали, что свет поглощается также только отдельными порциями. *Излученная порция световой энергии сохраняет свою индивидуальность и в дальнейшем.*

Впервые эта мысль была высказана Эйнштейном в 1905 году. В развитой им «эвристической точке зрения» свет всегда как бы складывается из отдельных порций, обладающих энергией и импульсом. Порция света оказывается неожиданно очень похожей на то, что всегда раньше связывалось с частицей.

Эти свойства света так и начали называть — «корпускулярные» («корпускулы» — значит «частицы»), а соответствующая «световая частица» получила название «фотон».

Свойства корпускул, частиц, у света и вообще у всех электромагнитных волн! Да возможно ли это?

Ведь с электромагнитными волнами прочно связано представление о распределенной, размазанной в пространстве материи!

Если любого из вас спросить, почему передачу одной радиостанции можно слушать сразу с помощью множества приемников, находящихся в разных местах, то ответ, вероятно, будет такой: потому что идущие от передатчика волны захватывают очень большую площадь.

Но этот, правильный, вообще говоря, ответ касается лишь одной стороны явления. Той стороны, в которой проявляется непрерывность.

А как же, с другой стороны, примирить это с парциальностью, с квантовыми представлениями? Ведь согласно последним волны и испускаются и поглощаются порциями, квантами. И каждая из таких порций не может «разделиться на части» — приемник или поглощает ее целиком, или не поглощает вовсе.

Но ведь мы же слышим всю передачу целиком, а не отдельные кусочки, которые нам удалось урвать у соседей!

Конечно, никакого парадокса здесь нет. Энергия кванта зависит от частоты: она равняется произведению этой частоты на знаменитую универсальную постоянную Планка h *). Даже для коротких радиоволн это произведение чрезвычайно мало. И, следовательно, посылая в эфир достаточно большую энергию, передатчик непрерывно выбрасывает громаднейшее количество квантов. Хватает на всех. Так, когда дует ветер, мы не ощущаем, что в наше лицо ударяется масса молекул. Все удары сливаются в одно ощущение мягкого напора воздуха.

Однако такое сглаживание происходит не всегда. И не только приборы в специально поставленных опытах, но и наши органы чувств оказываются способными это обнаружить.

В замечательных опытах С. И. Вавилова, например, было установлено, что человеческий глаз,

*) Мы уже встречались с этой величиной, правда, в несколько ином написании, а именно $\hbar$. Такое написание употребляется для краткости и означает $\hbar = h/2\pi$.

этот тончайший из «приборов» нашего организма, способен реагировать на различие в несколько десятков квантов света.

Было бы нелепо (да нам это, пожалуй, и не нужно сейчас) даже перечислять все опыты, которые с несомненностью подтверждают то, что в электромагнитных явлениях отчетливо проявляются как свойства волновые (т. е. те, что как будто бы с непреложностью говорят о непрерывности), так и свойства корпускулярные (т. е. такие, с которыми с той же степенью непреложности приходится связывать нечто дискретное, прерывистое).

Здесь напрашивается одна соблазнительная, казалось бы, возможность. Вспомните о ветерке, о котором мы только что говорили. Ведь там (или, еще нагляднее, в звуковых волнах) в конечном итоге тоже все сводится к движению корпускул — молекул. И лишь общая усредненная картина их движения создает то, что воспринимается как волна или ветер. Может, и световые частички — фотоны — летят себе, как подобает обычным порядочным частицам? Располагаясь в одних местах гуще, в других — реже, они и образуют то, что мы называем электромагнитной волной? Не правда ли, неплохое объяснение? Не тут-то было.

Абсолютно недвусмысленными опытами было доказано, что волновые свойства проявляются и у одного фотона. Даже у одного! Здесь есть над чем задуматься.

Но это лишь малая часть тех загадок, которые поставила перед исследователями природа.

Дуализм волн и частиц

Если с электромагнитным полем (до появления квантовой теории, во всяком случае) всегда связывалось представление о материи, непрерывно распределенной в пространстве, то электроны, наоборот, долгое время рисовались физикам как некие крохотные комочки материи. Это подчеркивалось уже самим названием «частица», постоянно сопровождавшим слово «электрон». Частица, в конечном итоге,— просто ньютоновская материальная точка. Вот как воспринимался электрон большинством исследователей. Надо сказать, что во многих случаях это представление давало возможность разоб-



раться в очень важных явлениях. О некоторых из них мы уже говорили, рассказывая об электромагнитных силах в действии.

И вот постепенно все стали забывать, что многие черты в «классическом портрете» электрона появились, так сказать, авансом. К ним привыкли. Они сделались для многих чуть ли не само собой разумеющимися, и отказ от них протекал очень болезненно. А необходимость в таком отказе делалась все очевидней. Все больше накапливалось фактов, говоривших, что классическая электронная теория, приводя в ряде случаев к хорошему качественному описанию, далеко не безупречна, когда речь заходит об описании количественном. Более того, иногда эта теория вообще приводила к каким-то странным, парадоксальным выводам. Напомним хотя бы уже упомянутую задачу об излучении электромагнитных волн нагретыми телами или фундаментальную проблему строения атомов.

Становилось все яснее, что назревает какой-то радикальный пересмотр старых установившихся представлений.

И вот в 1923 году молодой тогда французский физик Луи де Бройль выступил с идеей, которая была настолько необычной и казалась столь парадоксальной, что нашлось немало людей, воспринявших ее иронически. Де Бройль выдвинул гипотезу, согласно которой и *электрон, и любые другие частицы должны иметь волновые свойства наряду с корпускулярными*. Другими словами, та ситуация, которая уже создалась для электромагнитных волн, переносилась на все без исключения виды материи.

Скептики не долго иронизировали. Прошло немного времени, и за существование у электрона волновых свойств проголосовал авторитетнейший из арбитров — опыт!

Было доказано, что электроны, отражаясь от кристалла, ведут себя абсолютно так же, как это положено добропорядочным волнам.

Сомневаться в том, что и корпускулярные, и волновые свойства имеются у материи в любом ее проявлении, стало уже невозможно.

В науку вошла идея о так называемом корпускулярно-волновом дуализме.

Что же такое корпускулярно-волновой дуализм? Буквально «дуализм» означает двойственность, единство двух качеств. И у света, и у электронов проявляются, казалось бы, взаимно исключающие друг друга свойства частиц (корпускул) и волн.

Но ведь не может же электрон (будем конкретности ради говорить о нем) быть одновременно и частицей, и волной? Ведь мы сами только что подчеркивали несовместимость этих двух образов!

По-видимому, приходится ответить: да, не может. Значит?..

Значит, сказав, что электрон и волна, и частица, мы тем самым признали, что он не является, строго говоря, ни тем, ни другим — не является ни частицей в обычном смысле слова, ни волной. (То же самое относится к фотону.) Все частицы — это, если угодно, кентавры микромира.

И если мы употребляем все же термины «волна» и «частица», то их нужно понимать в том смысле, что электрон лишь приближенно можно описывать, например, как частицу. Что значит «приближенно»?

Соотношение неопределенностей

Когда говорят «частица», «материальная точка», то в воображении рисуется комочек вещества, находящийся в определенном месте (в данный момент времени) и движущийся с определенной скоростью. На более привычном физикам языке это означает, что можно задать координаты и скорости (или импульсы — произведение массы на скорость) частицы абсолютно точно.

Сказав, что электрон лишь приближенно может рассматриваться как материальная точка, мы имели в виду, что координаты и импульсы могут быть заданы только приближенно, с некоторой ошибкой. Количественно это выражается знаменитым

гейзенберговским соотношением неопределенностей. Соотношение Гейзенберга отражает то важное обстоятельство, что чем точнее определен, например, импульс, тем бо́льшая неточность будет в определении координаты. Нам удобно будет записать это в виде простого соотношения. Обозначим через Δx неопределенность координаты, а через Δp — неопределенность, с которой задается импульс. Тогда соотношение неопределенностей запишется в виде

$$\Delta p \geqslant \frac{h}{\Delta x},$$

где h — постоянная Планка.

Сходное соотношение связывает неточность энергии и неопределенность промежутка времени, в течение которого протекает процесс:

$$\Delta E \geqslant \frac{h}{\Delta t}.$$

Мы привели соотношения неопределенностей без детального вывода. Такой вывод потребовал бы от нас слишком глубокого рейда в теорию микроявлений, который мы не станем предпринимать.

Волны вероятности

Итак, частица в квантовой механике — это совсем не обычный шарик, пусть даже сверхмалых размеров. Она не имеет одновременно определенных значений координат и импульсов; она обладает волновыми свойствами.

Что же это за волны? Надо ожидать, что они не могут быть волнами классической механики, такими, например, как звуковые волны. Волна, связанная с электронами или фотонами, не состоит из множества частиц. Об этом уже говорилось.

Может быть тогда сама частица состоит из волны? Может быть материя, слагающая электрон, распределена в пространстве в виде волны: образует некоторый волновой пакет?

Нет, это тоже не так. Волна при встрече с препятствиями раздробляется на отдельные пучки, которые обратно уже не собираются вместе. А электрон-то ведь не дробится ни при каких условиях и всегда обнаруживается как целое.

Решение проблемы, причем решение неожиданное для всех физиков, было найдено Максом Борном. Связанная с электроном волна не есть обычная материальная волна классической физики. Это волна вероятности! Амплитуда волны (точнее — ее квадрат) определяет не плотность материи электрона в данном месте пространства, а вероятность того, что электрон будет здесь найден, если провести соответствующий эксперимент. В микромире мы поразительным образом сталкиваемся с вероятностными законами движения отдельных частиц.

В мире больших тел действуют законы механики Ньютона, однозначно определяющие малейшие детали поведения тел. А вот электрон и другие элементарные частицы, как выяснилось, в своем движении управляются иными законами. Эти законы не диктуют электрону строго однозначное поведение.

Например, если электрон пролетает сквозь щель, то из теории нельзя однозначно определить, полетит ли он налево или направо. Можно только найти сравнительное значение вероятностей этих событий.

Открытие вероятностных (или статистических) законов движения отдельных элементарных частиц — один из самых удивительных результатов, когда-либо полученных наукой. До сих пор были уверены, что статистические законы относятся только к описанию систем из очень большого числа частиц.

Мы, конечно, хорошо понимаем, что столь непривычные факты требуют гораздо более подробного рассказа. Но наша цель, как уже неоднократно подчеркивалось ранее,— рассказ о силах в природе, а не о законах движения. Поэтому ограничимся сказанным.

Вернемся теперь к соотношению неопределенностей и остановимся на некоторых его следствиях, бросающихся в глаза.

Некоторые следствия

Прежде всего постараемся рассеять недоумение, которое, должно быть, возникло уже у многих. Если любой частице, любому куску вещества присущи волновые свойства, то почему мы не обнаруживаем таких свойств у стола, за которым сидим, у книги, которую читаем, вообще ни

у одной из вещей, с которыми встречаемся постоянно?

Ответ прост: потому что они тяжелые. Их масса велика — и, значит, при абсолютно ничтожной неопределенности скорости, неопределенность координаты можно практически считать равной нулю. Кусок вещества не приближенно, а точно можно считать телом, не обнаруживающим никаких волновых свойств.

И только в случае малых масс, т. е. когда объектом исследования являются отдельные элементарные частицы (или их небольшие совокупности), неопределенность становится принципиальной и игнорировать ее нельзя.

Нельзя игнорировать, что теряет смысл такое понятие, как траектория: нельзя одновременно задавать и положение, и скорость.

Короче говоря, нельзя игнорировать фундаментальный факт: *ньютоновское описание движения становится невозможным.* Для нас это особенно важно и вот с какой стороны: определение понятия «сила», как было подчеркнуто, является строгим только в ньютоновской механике. Если же теперь мы убедились, что в микромире ньютоновское описание движения становится невозможным, то нельзя не сделать и следующего логически неизбежного вывода: изучая явления микромира, *нужно отказаться от сил, как от мерила взаимодействия.* Мы это отмечали уже во введении.

А что же остается? Остается энергия взаимодействия. Энергия оказалась (здесь проявляется глубина и универсальность закона сохранения энергии) куда более живучей, чем сила, и энергия принимает на себя всю нагрузку при описании взаимных влияний, имеющих место в микроявлениях.

Принцип неопределенностей и книга на столе

Множество самых разнообразных явлений помогает понять соотношение неопределенностей, причем понять, не вникая в механизм явлений, не рассматривая в деталях характер строения вещества и действующие внутри него силы. Вот, например, наш старый и довольно подробно обсужденный вопрос о книге, ко-

торая не проваливается сквозь стол. Спрашивается, почему?

Как только вы выпустили книгу из рук, она начинает падать под действием притяжения Земли. На пути встречается стол. Атомы стола начинают сминаться, электроны приближаются к ядрам атомов и начинают концентрироваться в меньших объемах. По принципу неопределенностей импульсы их увеличиваются и, следовательно, энергия также возрастает. Возникает сила, препятствующая движению книги вниз.

«Сопротивление атомов сжатию, — замечает по этому поводу Р. Фейнман, — это не классический, а квантовомеханический эффект. По классическим понятиям следовало ожидать, что при сближении электронов с протонами энергия уменьшится; наивыгоднейшее расположение положительных и отрицательных зарядов в классической физике — это когда они сидят верхом друг на друге. Классической физике это было хорошо известно и представляло загадку: атомы-то все же существовали! Конечно, ученые и тогда придумывали разные способы выхода из тупика, но правильный (будем надеяться!) способ стал известен только нам!»

Взаимодействие и волейбол

С появлением квантовой теории изменилось не только мерило взаимодействий — самый их механизм предстал в новом свете. Вы помните, как долго и настойчиво искали посредника во взаимодействиях тел. Эти поиски в конце концов привели к утверждению понятия поля — электромагнитного поля, в частности. Однако, как мы только что говорили, корпускулярно-волновой дуализм заставляет искать черты прерывного в непрерывном. Поле имеет и корпускулярное лицо. С корпускулярной точки зрения можно, следовательно, осмыслить и взаимодействие. Если раньше мы говорили: один заряд создает поле, которое действует на второй заряд, то теперь о том же мы имеем основание сказать и так: *первым зарядом создаются (испускаются) кванты, т. е. частицы-посредники, которые затем поглощаются вторым зарядом. Этот обмен промежуточными частицами, как механизм взаимодействия, и явля-*

ется «переводом на квантовый язык» прежней классической картины. Если раньше воздействие тел друг на друга вызывало ассоциации с какими-то нитями, протянутыми от одного из них к другому, то теперь более уместно представлять себе нечто вроде игры в волейбол между частицами.

Однако новое описание взаимодействия — это не просто переливание старого вина в новые меха. Квантовое истолкование вскрывает целые пласты новых возможностей. Мы увидим дальше, что это буквально переворот в понимании взаимодействия. Но прежде чем начинать разговор о новых возможностях, хочется на минуту вернуться к началу нашей книги. Вы помните спор о близкодействии и действии на расстоянии? Еще сравнительно недавно — в начале прошлого века — сама необходимость поисков «посредника» взаимодействия многим казалась сомнительной. Потом в науку вошло понятие о поле, как о переносчике взаимодействия. Но и поле многим долгое время представлялось каким-то эрзац-посредником — уж очень глубока была пропасть, отделявшая его от «настоящей» материи, описываемой законами механики Ньютона. Наконец, мы сделали еще один важнейший шаг: убедились, что посредник не только материален — обладает энергией, импульсом и т. д., но может — с таким же правом (и точностью), как и самые источники, взаимодействие между которыми он осуществляет,— рассматриваться как частицы. Никакой пропасти не оказалось. И то, чтó взаимодействует, и то, чтó переносит взаимодействие, предстало перед нами как обычная материя, в конечном итоге — как элементарные «частицы». И только кавычки у слова «частицы» заставляют нас вспоминать тот огромный путь, который прошла наука от ньютоновского описания движения до появления идеи о корпускулярно-волновом дуализме.

Однако, на какие новые возможности мы намекаем?

Спросим себя, можно ли оставлять монополию на перенос взаимодействия только за частицами электромагнитного поля? Нельзя ли и другим частицам (или их группам) также взять на себя роль переносчиков взаимодействия?

Идея оказалась очень интересной и плодотворной, — мы еще вернемся к ней, в частности, в следующей главе. А пока отметим только два важных момента.

Новое лицо заряда

Первый из них касается заряда. Нашего старого знакомого — электрического заряда. Чем он больше, тем сильнее его действие на окружающие заряженные частицы. На «квантовом языке» это означает, что чем больше заряд, тем больше квантов — переносчиков взаимодействия, посылается источником во все стороны. Значит, мы можем теперь сказать, что заряд является мерилом активности, интенсивности испускания (и поглощения), источником промежуточных квантов.

Если эти последние — кванты электромагнитного поля, то соответствующий заряд — электрический. Но, как уже отмечалось, кванты-посредники могут быть и другими частицами. Отсюда следует, что необходимо вводить и другие типы зарядов. Для каждого типа посредников — свой заряд, своя константа связи.

Это важнейший вывод!

Перебирая таблицу элементарных частиц, мы можем по очереди пробовать, подходит ли каждая данная частица (или их группа) на роль посредника. Критерии здесь сводятся к тому, чтобы не вступить в конфликт с законами сохранения. Однако природа накладывает и дополнительные запреты, так что большого разнообразия типов взаимодействия, какого можно было бы на первый взгляд ожидать, в действительности нет. Число возможных разновидностей «зарядов» совсем не велико. Задача нашей книги, в частности, и состоит в том, чтобы перебрать все известные нам разновидности. Мы вернемся к этому вопросу подробнее в главе о слабых взаимодействиях.

Перевоплощения в мире бесконечно малого

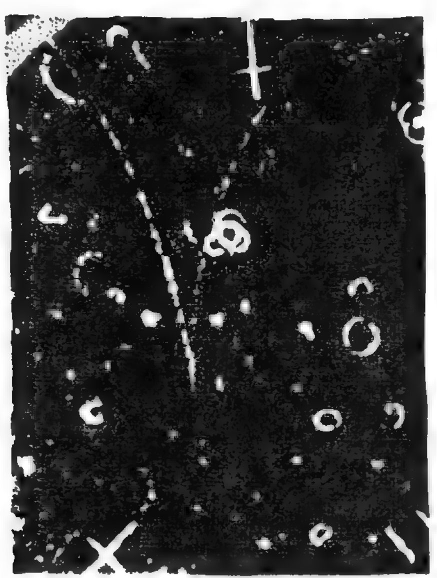
Разговор о различных зарядах заставил нас задеть тему, которая сама по себе имеет огромную важность. Несколькими строчками выше мы написали: частица (речь шла о частице, переносящей взаимодействие) испускается источником. Но что значит «испуска-

ется»? Ведь нельзя же представлять себе, что дело обстоит так же, как если бы мы открыли дверцу и выпустили птицу из клетки. Частицы до испускания не было внутри источника, она не хранилась в каком-то потайном сундучке. Фотон не прячется в атоме — он рождается, возникает в самом акте излучения.

Рождается!

Следовательно, возможно появление (и уничтожение, добавим) частиц? Да, именно к такому выводу привела нас цепочка рассуждений. Но не поспешили ли мы с выводами? Может быть, фотон — какая-то аномалия, нетипичная частица? (Ведь не даром из фотонов нельзя построить то, что в обыденном повседневном смысле называется веществом.)

Такие сомнения имели почву до 1927 года. В этом памятном для физиков году появилась работа молодого английского теоретика Дирака. Начал он с того, что попытался записать для электрона такое уравнение движения, которое бы находилось в соответствии с требованиями теории относительности. Как видите, довольно формальная на первый взгляд задача. Однако очень скоро (правда, не без трений и не без импульсов со стороны эксперимента) стало ясно, что сделать это можно, только предполагая, что у электрона есть «двойник» — частица, во всем подобная электрону, но с противоположным знаком заряда. Такая частица действительно была обнаружена в камере Вильсона. Назвали ее позитроном.



Как и электрон, эта частица, взятая в отдельности, вполне устойчива — она может существовать как угодно долго. Однако теория предсказала,

что стоит им встретиться, как электрон и позитрон должны исчезнуть(аннигилировать), порождая фотоны высокой энергии (γ-кванты). Может протекать и обратный процесс — рождение электрон-позитронной пары *). Например, при столкновении γ-кванта достаточной энергии с ядром.

В камере Вильсона, помещенной в магнитное поле, пара оставляет характерный след в виде двурогой вилки.

Электрон, «старейшая» из частиц, важнейший строительный материал для бесчисленных атомов, надежный, испытанный электрон оказался не вечным. Он мог исчезать! Он мог появляться! Это потрясло физиков, и — после того как эксперимент блестяще подтвердил предсказания теории — «породило (по словам одного известного теоретика) чудовищное ощущение благополучия».

Давно уже, вероятно, теория не казалась такой всемогущей, а все секреты природы — такими доступными.

Работы Дирака действительно занимают исключительное место в современной физике. Не удивительно, что имя их автора было окружено особым ореолом.

В годы, когда авторы были студентами, физики на своих вечерах часто читали «Песнь об электроне».

О Аполлон, покровитель прекрасный искусства,
В сердце певца огонь вложив вдохновенья,
Дай мне воспеть во имя великого сына Латоны
и Зевса любовь —
Мать красоты и бессмертья сестру!
Эроса юного вечно и Афродиту, из пены
рожденную,
Песня моя пусть прославит правду словами
о том,
Как летел, эфир возмущая,
С скоростью, меньшею скорости света,
И равномерно в отсутствие внешнего поля

*) Ясно, что поодиночке электроны, например, рождаться не могут — хотя бы из-за того, что при этом нарушался бы закон сохранения заряда.

Тот, кто волею славных богов *Электроном* зовется.
Много таких же, как он, электронов летало,
Но, Кулону покорны, едва подошедши друг к другу,
Быстро они расходились. И было причиной
То, что отталкивать лишь, покоясь, друг друга могли,
Но не притягивать!
И возроптал тот электрон, что летел, эфир возмущая,
С скоростью, меньшею скорости света,
И равномерно в отсутствие внешнего поля!
К богу Дираку с молитвою жаркою вдруг
Он обратился, такие слова говоря:
«Бог всемогущий, бог инвариантно *) великий,
Ты, что поставил в моем уравнении третью точку **),
О почему ты, законы вселенной презревши беспечно,
Мне повелел скитаться, любви не ведая счастья?
Дай мне подругу!»
Так страстно молил электрон грозного бога Дирака.
И, брови нахмурив, важно ответствовал он: «Так да будет!»
И поразивши ядро фотоном с $h\nu$ ***)
Больше $2mc^2$,
Первой пары рожденьем зарю новой эры отметил!
И с этих пор каждому, самому внешнему даже
Где-нибудь в атоме мчащемуся электрону
Так же, как мне и тебе, благородный читатель,
Нет для печали причины — и у него есть подруга!
Как у твоей, у нее, у прекрасной, энергии уровень меньше нуля,

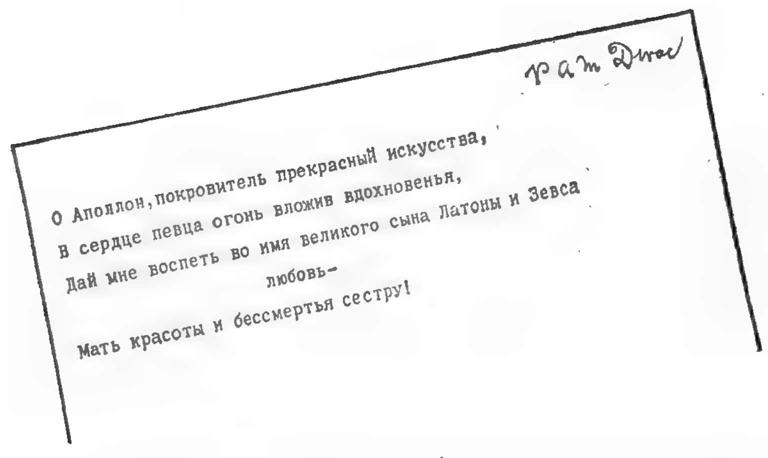
*) Инвариантный значит одинаковый во всех системах отсчета.

**) Имеется в виду упоминавшаяся ранее сила радиационного трения, обусловленная взаимодействием точечного заряда с собственным электромагнитным полем. Эта сила выражается через третью производную координат во времени.

***) Читается: «аш ню» — произведение постоянной Планка на частоту, что равно энергии фотона.

Постоянством
Также характер ее попрекнуть никак невозможно,
Главное ж, положительностью своею
Выше она электрона пребудет вовеки!
Песню кончая, хочу, чтоб она прозвучала
Гимном Эросу, прекрасному богу любви вездесущей,
Что обитает в жилище богов и в пастушьей лачуге,
В ветра дыханьи живет и в цветении малой былинки,
Вечный, прекрасный закон утверждая в вселенной:
Каждое ψ свое ψ* встретит! *)

Один из экземпляров песни хранит автограф Поля Адриена Мориса Дирака.


P. A. M. Dirac

О Аполлон, покровитель прекрасный искусства,
В сердце певца огонь вложив вдохновенья,
Дай мне воспеть во имя великого сына Латоны и Зевса любовь-
Мать красоты и бессмертья сестру!

Идея частиц и античастиц оказалась чрезвычайно плодотворной. «Двойники» нашлись у всех частиц (правда, в исключительных случаях вроде фотона частица и античастица совпадают). Обнаружены экспериментально антипротон, антинейтрон и т. д. Сейчас мы знаем, что рождение пар и аннигиляция не составляют монополии электронов и позитронов.

*) Читается «пси» и «пси сопряженное». Этими буквами обозначается обычно «волновая функция» — величина, с помощью которой в квантовой механике описываются частицы.

Стало понятным и другое. Взаимные превращения, т. е. уничтожение одних частиц и появление других, вовсе не обязательно идут по пути рождения пар частиц — античастиц и их аннигиляции. Реакции с элементарными частицами (термин позаимствован у химиков, он очень удачен) весьма многообразны. Но в них можно уловить и общие черты. Столкновения частиц напоминают удар огнива по кремню. «Огниво» — это частица-снаряд, обладающий достаточно большой энергией. Мишенью или «кремнем» также служат частицы или группы частиц. Удар «высекает» новые частицы — «искры». Он же разрушает кремень и огниво. Чем удар сильнее, тем больше может образоваться «искр» — частиц. Количество их порой достигает нескольких сотен. Сейчас уже накопился огромный экспериментальный материал о рождении частиц. Все эти данные не оставляют ни малейших сомнений: частицы (причем все без исключения) могут как появляться, так и исчезать.

Появляться? Исчезать? Но не противоречит ли это фундаментальнейшему из законов природы — закону сохранения материи? Разве материя может обращаться в ничто и возникать из ничего?

Разумеется, ничего подобного мы не утверждаем. Когда весной голые ветки деревьев в саду покрываются почками, а затем листьями, когда потом осенью на них повисают тяжелые плоды — разве кому-нибудь приходит в голову заподозрить здесь какое-то противоречие с законом сохранения материи? И почки, и листья, и плоды появляются не «из ничего». Здесь перед нами одно из бесчисленных звеньев извечного круговорота и взаимных превращений вещества, материи в природе.

С очень непохожим по внешнему виду, но, в конце концов, глубоко родственным переходом материи из одной формы в другую мы сталкиваемся, когда исследуем рождение и уничтожение частиц. Здесь тоже можно говорить о переходе материи из одного состояния в другое.

При аннигиляции электрона и позитрона материя переходит из электронно-позитронной формы в электромагнитную. Никакого «исчезновения», конечно, нет. Кстати, при этом (и при всех других процессах)

сохраняются заряд, энергия, импульс и т. д., что лишний раз показывает необходимость смотреть на все эти явления именно как на превращения.

Явное и сокровенное

Все сказанное наводит на мысль, что материю нужно описывать как нечто единое, а разные частицы рассматривать как различные проявления этой единой материи. Заманчивый путь! Но хотя попытки строить такую универсальную теорию и предпринимаются, говорить о радикальном успехе пока трудно. Мы не имеем еще возможности «строить» частицы. Приходится поэтому ограничиваться, так сказать, внешним описанием. Наше положение сейчас напоминает то, в каком оказался бы ботаник, если бы изучал жизнь растения по нескольким фотографиям: на одной — зерно, на следующей — росток, потом — цветок и, наконец, снова зерно. Такой ботаник твердо усвоил бы, что существуют разные состояния растения — зерно, росток, цветок. Он знал бы также, что они следуют друг за другом в определенной последовательности. Это позволило бы ему говорить о закономерностях превращений. Но вряд ли фотографии позволили бы установить внутреннюю динамику явления.

Перед физиком тоже ряд «фотографий». На них то, что мы несколько условно называли элементарными частицами. Это название оправдывается тем, что сегодня о структуре таких частиц мы ничего (или почти ничего) не знаем.

Все эти частицы вносятся в теорию как нечто взятое непосредственно из опыта. Это не нужно, разумеется, понимать слишком узко: сюда входят не только значения зарядов, масс, спинов и т. д., но и тонкие детали законов движения. Такое положение не случайно. Ведь теория возникает на почве эксперимента. Эксперимент же в общих чертах выглядит так: в регистрирующем устройстве (им может быть камера Вильсона, фотопластинка, система счетчиков и т. д.) видны один или несколько следов пучков первичных частиц. Все интимные детали взаимодействия скрыты от наблюдателя. Он обнаруживает только результат взаимодействия: опять-таки в виде следов вторичных частиц. Не все, разумеется, укладывается в такую

простую схему — некоторые из действующих лиц не имеют зарядов и не дают даже следов. Однако основное мы все-таки уловили: опыт дает только косвенные данные, по которым нужно разгадать картину взаимодействий.

Сравнение. Не слишком ли смелое!

Поскольку мы видим не самые взаимодействия, а лишь их результат — превращение одних частиц в другие (либо в те же, но в другом состоянии), появляется естественное — и вполне оправданное, добавим,— стремление отразить это положение и в теории. И как следствие такой теории возникает физическая картина, в которой центральное место отводится частицам, как чему-то, данному непосредственно опытом. Чтобы пояснить нашу мысль, представим себе на минуту, что мы ничего не знаем о молекулярном строении веществ. Тогда даже такая, как нам сейчас кажется, простая задача, как таяние льда, выглядела бы, вероятно, так. Исследователи могли бы подробно изучить свойства льда и свойства воды. Изучить на опыте, подчеркнем. Может быть, они даже назвали бы лед одной «элементарной сущностью», а воду — другой. Далее, опираясь опять-таки на эксперимент, они сформулировали бы закон: при определенных условиях (т. е. в данном случае при определенных температурах и давлении) лед переходит в воду.

Переходит — но как? За счет каких внутренних, сокровенных изменений? Этого без молекулярной картины не выяснить. И вот наши ученые оказались бы в том положении, о котором мы говорили, что оно не дает возможности понять внутреннюю динамику процесса. В конечном итоге и в фундаментальной проблеме элементарных частиц дело сводится к тому, что мы не знаем, каково строение, т. е., внутренние законы, этих частиц. Это-то и заставляет нас принимать их сейчас, так сказать, в готовом виде и описывать все многообразие процессов в микромире только как исчезновение «готовых» частиц и рождение новых.

Не нужно думать, что такой подход из рук вон плох. Физики — опытные следопыты, и им удалось, расшифровывая следы-треки, разобраться в очень тонко замаскированных эффектах, выдающих повад-

ки частиц. Мы не только умеем сейчас разбираться в законах движения свободных частиц, но знаем многое и об их взаимодействии. Как уже говорилось, оно, по современным представлениям, сводится к тому, что частица обменивается или перебрасывается с соседями квантами поля-посредника, т. е. обменивается тоже частицами, но другой природы.

Природа испускаемых и поглощаемых частицей квантов определяется тем, какой у этой частицы заряд. Если она заряжена электрически, то ей «дозволяется» испускать и поглощать фотоны; если у нее есть так называемый ядерный заряд (о нем речь будет дальше), то π-мезоны, и т. д. *).

Каждый такой акт испускания или поглощения переводит частицу из одного состояния в другое.

Взаимодействие с вакуумом

Мы говорили, что взаимодействие — это результат того, что одна частица испускает кванты, а другая их поглощает. А может ли частица сама поглотить испущенные ею кванты? Почему же нет — конечно, может. Такие процессы приводят к взаимодействию частицы с самой собой. О том же говорят иногда иначе: говорят о взаимодействии частицы с вакуумом. Как это ни парадоксально звучит, такое выражение совершенно оправдано. Ведь когда мы говорим о самовоздействии, то имеется в виду, что существует какое-то воздействие на частицу, даже когда она одна, когда вокруг нет (или может не быть) ни одной другой реальной частицы. Другими словами, когда кругом — вакуум, пустота.

Вакууму отводится сейчас очень почетное место в физике. В книгах пестрят такие словосочетания, как «поляризация вакуума», «вакуумные поправки», «вакуумные колебания» и многие другие. А ведь еще недавно считалось нелепым говорить о «свойствах вакуума». Какие «свойства» могут быть у пустого места? Ведь свойства — это нечто присущее материи. Там же, где материи нет...

*) Никаких конфликтов с законом сохранения энергии это не вызывает: длительность процессов Δt очень мала, и, согласно соотношению неопределенностей, «размазывание» энергии соответственно должно быть велико.

Стоп! Здесь-то и таится корень дела. Что значит «нет материи»?

«Ну, просто нет ни одной частицы»,— ответите вы. Не так-то это просто! Когда весной начинает расти трава, как ответить на вопрос: есть она или еще нет? «Когда она зазеленеет, когда росточки выглянут из-под земли — тогда есть»,— могут нам ответить. А до этого? Когда росточки еще не пробились, когда они еще ведут «подземное существование»?

После такого вопроса наши воображаемые собеседники могут, возмутившись, заявить, что мы занимаемся схоластикой, споря о том, что называется «уже травой», а что «еще не травой». В чем-то они будут правы. Но в чем-то и нет. Проросшую траву мы видим, воспринимаем непосредственно органами чувств. А там, где ростки еще не пробились, глаз видит голое поле,— тоже «вакуум», пустота в определенном смысле этого слова.

Эту аналогию мы не притянули за уши. Оказывается, и в теории элементарных частиц вакуум можно понимать не как «абсолютное ничто», а как особое состояние всех частиц, когда они имеют такую маленькую энергию, что непосредственно не воспринимаются не только глазом, но и любыми тончайшими приборами. Но вакуумные частицы «чувствуют» влияние «реальных» частиц, как-то перегруппировываются под их воздействием (что приводит, кстати, к экспериментально наблюдаемым эффектам). *Если воздействие достаточно энергично, то частица переводится из «невидимого вакуумного состояния» в самое обычное, реальное. Внешне это выглядит как рождение частицы. Точно так же уничтожение частиц можно рассматривать как их переход в вакуумное состояние.*

Такой способ описания не только возможен, но даже вполне естествен в нынешней теории, так как он позволяет, в соответствии со сказанным выше, не вдаваясь во внутреннюю динамику, просто описывать процессы рождения и уничтожения частиц, сведя их к переходам из одного состояния в другое (правда, одно из состояний несколько экзотическое). Вводя представление о вакууме и даже построив «теорию вакуума», физики добились больших успехов не толь-

ко в упорядочении своего теоретического хозяйства, но, что, конечно, всего важнее, и в описании опытных фактов. Более точно, чем раньше, вычисляются теперь энергетические уровни в атомах, найдены существенные поправки к значениям магнитных моментов электронов и т. д.

Ничего мистического в представлениях о физическом вакууме, разумеется, нет. Дело просто в том, что в квантовой теории электромагнитного поля получается, что не могут одновременно иметь определенные значения напряженности электрического и магнитного полей, с одной стороны, и число фотонов — с другой. Поэтому, если число фотонов равно нулю — а это и называется вакуумным состоянием электромагнитного поля,— то напряженности полей оказываются не нулевыми, а неопределенными, так что рассматривать вакуум просто как безликое ничто мы не можем.

Фотонный вакуум оказывает воздействие на заряженные частицы. Причем влияние фотонного вакуума — далеко не единственное. Вот еще один пример, на этот раз касающийся электон-позитронного вакуума. Опять-таки из-за квантового разброса энергий могут порождаться, а затем очень быстро аннигилировать виртуальные пары электронов — позитронов. Электромагнитное поле заряженных частиц возмущает распределение этих виртуальных пар. Это напоминает воздействие поля на распределение зарядов в атомах веществ, что, как известно, обусловливает поляризацию. По аналогии говорят о «поляризации электрон-позитронного вакуума» и, как следствие, об экранировке заряда, создающего поле.

Поляризация вакуума, как и взаимодействие с вакуумом электромагнитного поля, приводит к поправкам в значениях энергии атомных электронов и т. д. Теория дает полное согласие с опытом в пределах точности эксперимента. Именно это заставляет признать реальность вакуумных эффектов. Однако положение в теории далеко не благополучно. Собственная энергия электрона (а значит, и его масса), обусловленная взаимодействием с вакуумом электромагнитного поля (самовоздействие), оказывается бесконечно большой. Результат, конечно, удручающе нелепый. Не

менее нелепым получается и другой вывод теории: поляризация электрон-позитронного вакуума должна приводить к полной экранировке заряда.

Но если это так, то как же удается, учитывая вакуумные поправки, получать конечные результаты, согласующиеся с опытом?

Это достигается с помощью так называемой «техники перенормировок» заряда и массы, техники, которая позволяет выделить из бесконечно больших величин конечные — и (это важно!) зависящие от состояния — части в точном соответствии с экспериментом.

Все расходимости, возникающие в квантовой теории электромагнитных воздействий, оказываются связанными только с массой и зарядом. Поэтому можно рассуждать так. Мы пока не умеем вычислять вакуумные поправки к массе и заряду, не можем теоретически определять m и e. Но экспериментальные их значения хорошо известны. Если в конечный результат любого расчета вместо даваемых теорией бесконечных значений подставить эмпирические значения m и e, то все результаты расчетов будут конечными. Этот метод выделения конечных значений для физических величин называется перенормировочным. Любопытно отметить, что, по мнению одного из творцов перенормировочной техники, Р. Фейнмана, вся эта процедура — не более чем «заметание мусора под ковер». Ясно, что полумерами положения здесь не исправишь. Новое понимание природы элементарных частиц, по-видимому, заставит нас пересмотреть многое, что кажется нам сейчас таким (уже!) привычным и естественным.

А пока... Как океан, заполняющий все вокруг, рисуется нам «вакуум», из которого, подобно «чудищам», выныривают там и здесь частицы.

Можете считать, что это — океан неизведанного. Глубина его бесконечна.

Конечно, не вставка, а главы и даже, повторяем, новая книга потребовалась бы нам, чтобы заглянуть в него чуть глубже.

Глава пятая

ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Могучие силы
Сомкнуло в миры,
И чудной, прекрасной
Повеяло жизнью.

А. В. Кольцов, «Великое слово»



1. ***Ядро и элементарные частицы.***

2. ***Как осуществляются ядерные взаимодействия?***

3. ***Превращение атомных ядер.***

I.

На границе неизведанного

Атомное ядро... Ядерная энергетика... Атомный век... Эти и десятки других, так или иначе связанных со словом «ядро» терминов заполняют страницы газет, книг, научных статей, волнуют людей, пробуждая и ужас и надежды. Можно смело сказать, что никогда никакие научные открытия не играли такой огромной роли для всего человечества, как открытия в области ядерной физики. Даже совсем далекие от физики люди не могут относиться к ним безучастно.

И в то же время... в то же время целые области белых пятен простираются здесь перед исследователем. Как же это возможно? — спросит с недоумением читатель. Ведь уже давно советские ученые включили рубильники первой атомной электростанции, уже взламывает ледяные поля атомный ледокол, уже стали необходимыми в самых разнообразных областях — от металлургии до производства елочных украшений — специалисты-ядерщики. Как же возможно, что такое огромное и важнейшее место заняла наука, самые основы которой содержат какие-то (и немалые) неясности? Конечно, ничего парадоксального в этом нет. Мы находимся сейчас в таком же примерно положении, как каменщик, который умеет складывать из кирпичей здание, но о многих свойствах самих кирпичей, может быть даже о том, как они делаются, имеет лишь смутное представление. Иногда в таких случаях говорят, что мы изучили некоторые свойства, но не знаем сути. Пожалуй, это не совсем удачное для нашего случая выражение, но оно правильно отражает то



обстоятельство, что мы еще не умеем единым образом объяснять всего множества опытных данных. Удивляться этому не приходится. Ядерная физика ставит проблемы, решение которых прямо упирается в самый основной вопрос — вопрос о строении вещества вообще, т. е. в конечном итоге об элементарных частицах. Их (опять напрашивается то же сравнение) иногда называют кирпичиками мироздания. И вот здесь мы пока оказываемся в положении Карла Линнея: мы не слишком далеко продвинулись за пределы систематики. Об «устройстве» этих частиц, даже о том, а что, собственно, подразумевается под словом «элементарные», практически ничего не известно.

Здесь проходит граница с областью неизведанного. Граница неустойчивая, подвергающаяся бурному натиску, но еще ни разу достаточно радикально никем не преодоленная. Впрочем, ядерная физика в этом отношении вовсе не находится в особом положении. Стоит повнимательнее вдуматься в любую проблему — и очень скоро цепочка рождающих друг друга «почему» приведет вас к области неизученного. Не зря говорится, что, изучая какой-нибудь вопрос, человек последовательно проходит через три стадии: первая — «все понятно», вторая — «все непонятно» и последняя — «кое-что понятно».

Из чего складываются ядра?

Почему же все-таки изучение атомного ядра вынуждает нас заниматься элементарными частицами? Ведь, интересуясь, например, движением планет, которые в конечном итоге тоже состоят из элементарных частиц, мы могли специально этого не акцентировать.

Причина совершенно ясна: в ядрах атомов частиц так мало, что свойства каждой из них в отдельности не «усредняются», не нивелируются, а, напротив, играют определяющую роль.

Значит, хотя в конечном итоге мы хотим построить здание, начинать придется все же с кирпичей. Это тем более для нас важно, что, не разобравшись в составе ядер, нельзя приступить к рассказу о внутриядерных силах. Здесь опять ядерная физика ставит нас перед новой ситуацией. Действительно, ни гравитационные, ни (хотя и в меньшей степени) электро-

магнитные силы не потребовали подробного рассказа о том, как устроены, из чего состоят участвующие во взаимодействии куски вещества. «Ядерное вещество» настолько своеобразно, что оторвать вопрос о том, «что взаимодействует», от вопроса о том, «как взаимодействует», невозможно.

Одна маленькая девочка сказала, что гамак — это «много узелков, связанных веревочками».

Так можно было бы сказать о многом. Вот, например, атом. Он тоже состоит из «узлов» — ядер и электронов и «веревочек» — электрических полей, удерживающих все эти частицы. И мы, отвечая на вопрос о составе атома, не упоминаем об этих полях согласно ставшей традиционной манере выделять то, *что* связано, оставляя в тени, *чем* связано (это уходит корнями еще в механику). Но в ядре положение радикально меняется. Здесь сами «узелки» в какой-то мере неотделимы от «веревочек». Поэтому-то мы и вспомнили, что сказала девочка о гамаке.

Теперь читателю должно стать яснее, почему, ставя своей главной задачей рассказ о силах, мы все же должны начинать с того, каков состав ядер.

Физикам известно несколько десятков видов более или менее стабильных элементарных частиц *). Они различаются своими массами, электрическими зарядами и другими, как принято говорить, внутренними свойствами. Выбор, как будто, богатый, строительного материала для атомных ядер на первый взгляд вполне достаточно. Представим же себе сейчас, что перед нами лежат две таблицы — таблица ядер и таблица элементарных частиц. Если говорить о массе, то самое легкое ядро у атома водорода **). Оно в 1836,12 раза тяжелее электрона и имеет равный с ним по величине, но противоположный по знаку (положительный) заряд. Среди элементарных частиц находится одна — протон,— у которой точно такие же свойства. Значит, состав одного ядра мы расшифровали. Но со всеми остальными ядрами так гладко не

*) Не имеет смысла уточнять цифру, так как даже сам критерий элементарности еще далеко не выяснен.

**) Масса атома практически совпадает с массой ядра: доля электронов в лучшем случае составляет около пяти сотых процента.

Таблица элементарных частиц

	Название	Символ: частица	Символ: античастица	Масса	Спин	Электрический заряд	Время жизни, *сек*	Основные продукты распада
	Фотон	γ	γ	0	1	0	Стабилен	
Лептоны	Нейтрино электронное	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	½	0	Стабильно	
	Нейтрино мюмезонное	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	½	0	Стабильно	
	Электрон	e^-	e^+	1	½	—1	Стабилен	
	Мю-мезон	μ^-	μ^+	206,7	½	—1	$2{,}2\cdot 10^{-6}$	$e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$
Мезоны	Пи-мезоны	π^0	π^0	264,1	0	0	$0{,}8\cdot 10^{-16}$	$2\gamma,\ \gamma + e^+ + e^-$
		π^+	π^-	273,1	0	1	$2{,}6\cdot 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu$
	K-мезоны	K^+	K^-	966,4	0	1	$1{,}23\cdot 10^{-8}$	$\left\{\begin{array}{l} e^+ + \nu_e + \pi^0 \\ \mu^+ + \nu_\mu,\ \pi^+ + \pi^0 \\ 3\pi,\ \mu^+ + \nu_\mu + \pi^0 \end{array}\right.$
		K^0	$\overline{K}^0$	974,1	0	0	K_S^0, $0{,}86\cdot 10^{-10}$	$\pi^+ + \pi^-,\ 2\pi^0$
							K_L^0, $5{,}38\cdot 10^{-8}$	$\pi^0 + \pi^+ + \pi^-,\ \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
	Эта-нуль-мезон	η_0	η_0	1074	0	0	10^{-17}	$\eta_0 \to \gamma + \gamma$ (35,3%) $\eta_0 \to \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$ или $\eta_0 \to \pi^0 + \gamma + \gamma$ } 31,8% $\eta_0 \to \pi^+ + \pi^- + \pi^0$ (27,4%) $\eta_0 \to \pi^+ + \pi^- + \gamma$ (5,5%)

Таблица элементарных частиц

	Название	Символ		Масса	Спин	Электрический заряд	Время жизни, *сек*	Основные продукты распада
		частица	античастица					
Барионы	Протон Нейтрон	p n	$\bar{p}$ $\bar{n}$	1836,1 1838,6	½ ½	1 0	Стабилен 960	$p+e^-+\bar{\nu}_e$
	Гиперон лямбда	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	2184,1	½	0	$2{,}5\cdot10^{-10}$	$p+\pi^-$, $n+\pi^0$
	Гипероны сигма	Σ^+ Σ^0 Σ^-	$\bar{\Sigma}^+$ $\bar{\Sigma}^0$ $\bar{\Sigma}^-$	2327,6 2333,6 2343,1	½ ½ ½	1 0 —1	$0{,}8\cdot10^{-10}$ 10^{-14} $1{,}49\cdot10^{-10}$	$p+\pi^0$, $n+\pi^+$ $\Lambda^0+\gamma$ $n+\pi^-$
	Гипероны кси	Ξ^0 Ξ^-	$\bar{\Xi}^0$ $\bar{\Xi}^-$	2572,8 2585,6	½ ½	0 —1	$3{,}03\cdot10^{-10}$ $1{,}66\cdot10^{-10}$	$\Lambda^0+\pi^0$ $\Lambda^0+\pi^-$
	Омега-минус-частица	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	3373	$^3/_2$	—1	$1{,}3\cdot10^{-10}$	$\Omega^-\to\Xi^0+\pi^-$ $\Omega^-\to\Xi^-+\pi^0$ $\Omega^-\to\Lambda^0+K^-$

Примечание. Масса и спин, а также время жизни античастицы имеют те же значения, что и для частицы. Заряд античастицы противоположен по знаку и равен по абсолютной величине заряду частицы.

получается. Вот, например, ближайший сосед водорода в периодической системе Менделеева — гелий. Ядро гелия (мы пока не будем говорить о так называемых изотопах) почти точно в четыре раза тяжелее водородного. Может быть, оно состоит из четырех протонов? Но тогда бы его электрический заряд был тоже вчетверо больше протонного, а на самом деле он больше только в два раза. Нельзя ли устранить это затруднение, допустив, что в ядре, кроме протонов, находятся и другие частицы, заряженные отрицательно и компенсирующие «лишний» заряд? Если к тому же эти частицы обладают небольшой массой, можно, как будто, свести концы с концами. Такая возможность выглядит на первый взгляд соблазнительно, тем более, что подходящая частица — наш старый знакомый электрон. На первый взгляд... Но почему же тогда и теоретики и экспериментаторы дружно восстали против такой электронно-протонной модели? Их доводы были достаточно вескими. Электрон, оказывается,— слишком легкая частица. Нам еще предстоит познакомиться с этим подробнее.

А сейчас... сейчас мы вдруг убеждаемся, глядя на длинную таблицу элементарных частиц, что говорить об «огромном выборе» не приходится. Выбирать-то как будто и не из чего! Дело в том, что в таблице частиц есть графа: «время жизни». Оно колеблется в весьма широких пределах: от тысячи (примерно) секунд у нейтрона до фантастически маленького промежутка времени, выражающегося числом $0{,}8 \times 10^{-16}$ у частицы, называемой пи-ноль-мезоном (обозначается π^0). По истечении этого «времени жизни» частицы распадаются, превращаясь в другие.

Но ведь атомы, а значит, и их ядра (то же ядро гелия, например) не только не распадаются сами по себе, но даже вынудить их к этому очень трудно. Они стабильны. Казалось бы, они и состоять могут лишь из стабильных частиц. Но среди элементарных частиц нет ни одной стабильной, кроме протона и антипротона (исключая легкие частицы, которые, как уже говорилось, не могут ужиться в ядре). Ни одной!

К чему же мы пришли? Из одних протонов ядра состоять не могут — это ясно. Остальные же частицы

или слишком легки, чтобы быть составными частями ядер, или нестабильны. Где же выход?

О здравом смысле

Нужно со всей определенностью сказать, что, не будь квантовой механики, мы были бы совершенно беспомощны перед теми загадками, которые задает нам ядро. Здесь в полном смысле слова царство «микрофизики» со всем тем, что нередко кажется парадоксальным с точки зрения наших привычных представлений, воспитанных образами мира больших вещей. Наша интуиция, основанная на классической наглядности, часто становится здесь не союзником, а врагом исследователя.

Возьмем хотя бы уже упоминавшееся обстоятельство, что легкие частицы — во всяком случае электроны — не могут быть составными частями ядра. Классическая теория здесь ничего не объяснит. Вспомнив же соотношение неопределенностей, нам будет легко разобраться в этом вопросе.

Ядра имеют очень маленькие размеры. Многочисленные эксперименты показали, что эти размеры составляют примерно одну стомиллиардную долю миллиметра. Значит, именно такой можно считать неопределенность координаты внутриядерной частицы. Это дает возможность сразу же определить неопределенность импульса, а, следовательно, поскольку масса частицы известна, и скорости.

Сделаем еще один шаг: вспомнив, что кинетическая энергия равняется половине произведения массы на квадрат скорости, найдем разброс в значениях этой энергии. Легко убедиться, что он обратно пропорционален массе частицы. Для тяжелых частиц, например протонов, разброс сравнительно мал, но для электронов он возрастает почти в две тысячи раз и становится значительно больше известной из опыта энергии связи в ядрах, т. е. энергии, с которой взаимодействуют внутриядерные частицы. Но если энергия связи меньше кинетической, то, значит, силы взаимодействия недостаточны, чтобы удержать частицу. Она очень скоро, преодолев взаимодействия, покинет ядро.

Следовательно, даже если легкая частица в силу каких-то причин влетит в ядро, то уже одних энерге-

тических соображений достаточно для доказательства того, что ужиться там она не сможет.

Опять о составе

Итак, строительный материал для ядер нужно искать только среди тяжелых частиц. Таких частиц, не считая хорошо известного нам протона, в современной таблице довольно много: это прежде всего нейтрон и большая группа так называемых гиперонов*).

Гипероны, вообще говоря, могут входить в состав ядра. При этом образуются так называемые гипер-ядра, обнаруженные на опыте. Однако все гипер-ядра неустойчивы: они очень быстро распадаются, что вовсе не удивительно, так как сами гипероны живут не больше десятимиллионной доли секунды.

У нас в резерве осталась только одна частица — нейтрон. Физики знакомы с нейтроном сравнительно давно: он был открыт молодым тогда ученым Чадвиком в лаборатории Резерфорда еще в 1932 году.

Нейтрон не имеет электрического заряда. По массе он почти совпадает с протоном (протон, как уже говорилось, в 1836 раз, а нейтрон — в 1839 раз тяжелее электрона, т. е. разница незначительная).

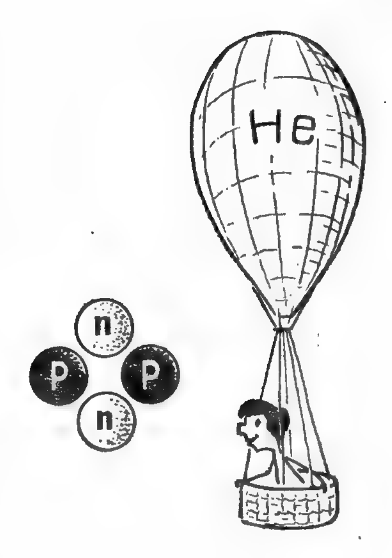
Протонно-нейтронная модель

Нейтральная тяжелая частица — не она ли наряду с протоном входит в состав ядер? Например, ядро гелия: оно имеет заряд, вдвое превосходящий протонный, а по массе больше него почти точно в четыре раза. Если предположить, что в этом ядре по два протона и нейтрона, то мы придем как раз к тому, что нужно. Прекрасные результаты получаются и для ядер всех других элементов. Не только заряд и масса — все остальные характеристики также оказываются в превосходном согласии с экспериментом.

Нейтрон настолько активно «напрашивается» на роль ядерной частицы, что по меньшей мере в двух

*) Мы не будем говорить об антипротонах, антинейтронах и других античастицах. При встрече античастицы с частицей (например, антипротона с протоном) — а такие встречи в нашем мире неизбежны — происходит то, что физики называют аннигиляцией. Пара исчезает, превращаясь в новые частицы. Из-за аннигиляции ядро, содержащее как частицы, так и античастицы, не может быть долговечным.

странах — Советском Союзе (Иваненко, Гапон) и Германии (Гейзенберг) практически одновременно, как только появились сведения об опытах Чадвика, были сформулированы основные идеи протонно-нейтронной модели ядра — модели принятой и общепризнанной поныне.



Однако как примирить устойчивость ядер, с одной стороны, и нестабильность нейтрона — с другой? Ведь хотя на фоне других частиц нейтрон и выглядит как сравнительно очень устойчивый, но нельзя же попросту сбросить со счетов, что, просуществовав примерно шестнадцать минут, он распадается. Как объяснить тот непреложный факт, что десятки видов ядер живут больше шестнадцати минут, а значительное число из них — практически вечно?

Неизменное в изменчивом

Устойчивость... А что, собственно, скрывается за таким словом? Неподвижна водная гладь тихого лесного пруда. И таким же неподвижным, будто остекленевшим, кажется порой низвергающийся со скалы водопад. Но и здесь, и там за кажущейся неподвижностью, за устойчивостью скрывается интенсивное движение. Непрерывно вылетают с поверхности воды молекулы — идет испарение. Одновременно протекает и обратный процесс — молекулы пара захватываются водой. Если эти встречные потоки молекул одинаковы, то уровень воды не меняется — сохраняется равновесие. В водопаде к этому прибавляется еще движение всей массы воды, но и здесь тоже царит равновесие, так как на место каждой ушедшей капли приходит новая, которую в свою очередь сменит следующая.

Стало быть, стабильность, устойчивость вовсе не означает полного отсутствия движения. Важно лишь,

чтобы характер этих движений обеспечивал непрерывное восстановление системы. В таких случаях говорят о динамическом, подвижном равновесии. Но является ли устойчивость ядра именно такой динамической устойчивостью? Очевидно, так: другой возможности нет.

За счет чего же может обеспечиваться динамическое равновесие? По-видимому, находясь внутри ядра, нейтрон становится участником таких процессов, на фоне которых его нестабильность перестает играть роль. Что же это за процессы?

2.

Сравнение, к которому мы часто будем возвращаться

Начнем с характерного примера, который в различных вариантах часто привлекается для иллюстрации внутриядерной динамики. Представьте себе, например, что два человека несут груз, причем такой, что двоим одновременно невозможно за него взяться и вместе с тем настолько тяжелый, что одному не под силу удерживать его долго. Поставить груз на землю и отдохнуть тоже нельзя. По условию, если груз выпал из рук, то поднять его уже невозможно.

Если бы не было второго человека, то дело кончилось бы, конечно, тем, что первый рано или поздно выронил бы ношу. (Здесь сразу напрашивается сравнение с нейтроном, который, будучи одиночным, распадается.) Но вместе люди смогут нести груз, передавая его, как только наступает усталость, от одного к другому.



Не происходит ли в ядре нечто подобное? Ведь мысль о том, что только присутствие протона рядом

с нейтроном стабилизирует последний, невольно приходит на ум, когда думаешь о том, почему же свободный, взятый в отдельности нейтрон неминуемо распадается, а в ядре он ведет себя как вполне устойчивая частица.

Наконец, если проводить аналогию с нашим примером, то что же может играть роль того «груза», которым обмениваются протон и нейтрон?

Все упирается во взаимодействие

Здесь мы должны остановиться и основательно подумать: а какие, собственно, у нас есть соображения в пользу приведенной аналогии? Почему обязательно считать, что нейтрон и протон должны чем-то обмениваться? И, наконец, как выяснить природу этого «чего-то»?

Сейчас мы подошли к удобному моменту, чтобы вспомнить одну «небольшую деталь»: частицы в ядре не только присутствуют, они еще теснейшим образом спаяны между собою. Мало «стабилизировать» нейтроны — нужно еще объяснить устойчивость всего ядра. И вот оказывается, что эти две проблемы самым тесным образом переплетаются между собой.

Таким образом, мы вплотную подошли к вопросу о внутриядерных взаимодействиях.

Несколькими страницами выше, рассматривая картину взаимодействий в квантовой теории, мы неожиданно обнаружили, что она напоминает... волейбол. Частицы обмениваются, перебрасываются квантами промежуточного поля. С этой точки зрения и взаимодействие протонов и нейтронов внутри ядра должно определяться тем, что они перебрасываются какими-то частицами. Частицами — переносчиками взаимодействия.

Такая физическая картина очень наглядна. Вспомним хотя бы наш пример: два человека с тяжелым грузом. Ведь для того, чтобы они могли удерживать ношу, им нужно все время передавать ее друг другу. Но для этого они должны непременно находиться рядом. Необходимость (и возможность) обмена сближает, связывает. Для стороннего наблюдателя все будет представляться так, как если бы действовали силы притяжения.

Конечно, это сравнение, как и всякая аналогия, должно в основном служить одной цели: создать наглядный образ.

Однако этот образ сам по себе может служить ключом к более глубокому пониманию сути явления.

И снова возникает вопрос о «частицах-посредниках», цементирующих ядро. Что это, собственно, за частицы? Каковы свойства этих частиц?

Классическая механика и ядро

Здесь опять в который раз приходится писать снова: без квантовой теории в этом не разобраться. Действительно, представим себе на минуту, что ядро живет по законам классической физики.

Остановимся хотя бы на простейшем ядре — дейтоне. Оно состоит из одного протона и одного нейтрона. Вот стоят они рядом, «горя желанием» взаимодействовать, т. е. обмениваться какими-то частицами. Но, увы, классическая механика неумолимо запрещает им это. Действительно, чтобы началось взаимодействие, каждая из них должна выбрасывать (испускать, говорят физики) и поглощать частицы.

Свободной же частице в рамках классической механики законы сохранения энергии и импульса запрещают какое бы то ни было испускание *). (Не нужно путать испускание частицы с ее распадом. При испускании нейтроном каких-либо частиц, обозначим их буквой A, процесс идет по схеме:

$$\text{нейтрон} \rightarrow \text{нейтрон} + A.$$

Другими словами, нейтрон существует и до, и после превращения.)

Особенно прозрачна ситуация с массой. Ведь если бы протон (или нейтрон) испустил какую-то частицу, то она, очевидно, унесла бы часть массы. Так вот, забегая немного вперед и найдя в таблице массу переносчиков внутриядерного взаимодействия, мы можем вычесть ее из массы протона и убедиться, что остаток не подходит ни к одной из масс имеющихся в таблице частиц. Явный парадокс! Не может же, в самом деле,

*) Так, например, свободный электрон не может испускать (и поглощать) электромагнитные волны.

протон или нейтрон после испускания промежуточной частицы превратиться в нечто такое, чего вообще не существует!

Этот парадокс не единственный. Строго говоря, все явления внутри ядра абсолютно парадоксальны, если подходить к ним с меркой классической теории. Мы уже и раньше сталкивались с такими парадоксами.

Теперь попробуем разобраться в вопросе о частицах-посредниках, подходя к нему с позиций квантового описания происходящих событий.

Выводы из ... неопределенности

Возражение, касающееся того, что закон сохранения энергии и импульса запрещает внутриядерным протонам и нейтронам испускать и поглощать какие бы то ни было частицы, отпадает сразу. Ведь уже отмечалось, что ни координата и импульс, ни энергия и время существования любой из составляющих ядро частиц не могут иметь одновременно определенные значения. Разброс или, на более привычном физикам языке, квантовая неопределенность этих величин сразу снимает наши затруднения.

Однако это еще не все. Остается парадокс с массами. И вот здесь мы неожиданно убеждаемся, что квантовая механика не только спасает положение, но даже черпает в самой трудности необычайно ценный источник новых сведений о квантах, переносящих взаимодействие.

Однако давайте двигаться последовательно, набравшись некоторого терпения и храбрости: ведь нам предстоит хотя и простой, но все же расчет.

Мы говорили о разбросе энергий частиц в ядре. Фиксируем свое внимание, скажем, на каком-то протоне. Обозначим разброс его энергии через $\Delta\varepsilon$.

Очевидно, энергия кванта — переносчика взаимодействия (обозначим ее буквой E) как раз и должна «укладываться» в рамки этого разброса. Это позволяет написать равенство

$$\Delta\varepsilon = E.$$

А теперь нам нужно учесть широко известный факт, открытый Эйнштейном: между массой и энер-

гией существует замечательное универсальное соотношение. Словесная формулировка этого соотношения такова: энергия равняется произведению массы на квадрат скорости света. В буквенных обозначениях это выглядит так:

$$E = mc^2.$$

Теперь нужно сделать еще один шаг. Каково значение разброса энергии $\Delta\varepsilon$? Здесь нам поможет соотношение неопределенностей. Как мы уже знаем, неопределенность энергии связана с тем временем, за которое протекает процесс, соотношением

$$\Delta\varepsilon = \frac{h}{\Delta t}.$$

Что же это за время Δt? Очевидно, его можно приравнять просто времени «пребывания в пути» частицы — переносчика взаимодействия. Ведь это и есть промежуток между моментом испускания и моментом поглощения кванта, т. е. то, что с полным правом можно назвать «временем взаимодействия».

Но время пребывания в пути равно проходимому расстоянию l_0, деленному на скорость движения.

Нас интересует сейчас лишь качественная оценка. Поэтому мы можем просто принять, что l_0 совпадает с размерами ядра (т. е. что каждый квант пересекает ядро из конца в конец), а скорость равна скорости света. Тогда получается

$$\Delta t = \frac{l_0}{c}.$$

Не представляет труда найти из написанных равенств массу «частицы-посредника»:

$$m = \frac{h}{l_0 c}.$$

Замечательно, что все величины, через которые выражается m, уже давно известны из опыта. Подставляя значения постоянной Планка h, размеров ядра (точнее нужно было бы говорить: «радиуса взаимодействия») l_0 и скорости света c, мы обнаруживаем, что масса m должна равняться примерно двумстам-тремстам массам электрона.

Пусть извинят нам читатели ту небольшую порцию вычислений, которую мы решили привести здесь. Это в полной мере окупается важностью полученных результатов.

Мы сумели выяснить очень существенные детали ядерных взаимодействий. Перечислим самое важное:

1. Взаимодействие является результатом обмена частицами.

2. Расстояние, на котором проявляется взаимодействие (или, как его часто называют, радиус действия сил), тем меньше, чем больше масса частиц, переносящих взаимодействие:

$$l_0 = \frac{h}{mc}.$$

3. Взаимодействие является специфически квантовым (присутствует постоянная Планка h).

Знакомство с мезоном начинается с теории

Эти интереснейшие выводы были сделаны впервые японским ученым Юкава. В то время список элементарных частиц был очень скромен: фотон (квант электромагнитного поля), электрон вместе с «зеркально подобным» ему позитроном, нейтрино, протон и нейтрон. Вот, собственно, и все. Замечательная научная смелость Юкава проявилась в том, что он, проанализировав факты, решительно заявил: должна существовать частица, отличающаяся от всех известных, с массой, примерно в двести раз большей, чем электронная. Она-то и обусловливает внутриядерные взаимодействия.

Предсказание блестяще оправдалось. Частица которую Юкава назвал мезоном, и даже, собственно, не одна, а три частицы с близкими массами, но различно заряженные (положительная, отрицательная и нейтральная), вскоре были обнаружены экспериментально, и их свойства совершенно точно отвечали тем, которые диктовались теорией. Мезонная теория ядерных сил объясняет многие стороны явления.

Короткодействие

Эти силы действуют на очень маленьких расстояниях. Из этого мы, собственно, исходили, когда, опираясь в конечном итоге на экспериментальные факты, искали массу мезона. Нечто подобное проис-

ходит, если, разломив, скажем, кусок мела пополам, попытаться соединить половинки, прижимая их друг к другу. Почему это не удается? На месте излома молекулы «чуть-чуть» дальше друг от друга, чем в сплошном куске. И этого уже достаточно, чтобы практически выключилось взаимодействие. В ядре это сказывается намного резче.

Физики говорят, что ядерные силы короткодействующие. Можно подойти вплотную к ядру и не почувствовать их, хотя внутри ядра взаимодействия огромны и стабилизируют ядро.

Велики ли ядерные силы!

Только что мы написали: внутри ядра действуют огромные силы; в нем заключена гигантская энергия. Давайте же попытаемся сравнить их с чем-нибудь нам хорошо знакомым. Можно ли назвать огромной энергию, которая выделяется, например, когда человек чихает? Разумеется, нет,— ответите вы. Точно так же работа, которую нужно затратить, чтобы поднять с пола копеечную монетку, очень мала. Ведь каждый день любой из нас совершает неизмеримо бо́льшую работу.

Вероятно, поэтому многим покажется удивительным, что работа в наших примерах в миллиарды раз больше, чем та энергия, которая необходима, чтобы вырвать частицу из самого прочного ядра. В миллиарды раз!

Позвольте, но почему же тогда говорят об огромных внутриядерных энергиях? Почему строятся гигантские ускорительные установки, потребляющие энергии больше, чем иной город, и предназначенные для расщепления ядер, если, даже чихнув, мы совершаем работу, достаточную, чтобы разорвать связи внутри многих и многих ядер?

Вы, конечно, уже понимаете, в чем дело? Важна не общая энергия, а та, что приходится на одно ядро или, еще лучше, на одну частицу в ядре. Хотя, поднимая копейку, мы сообщаем ей общую энергию, в миллиарды раз превосходящую энергию связи в ядрах, на долю каждой ядерной частицы приходится ничтожно малая доза: меньше, чем одна миллионная одной миллионной доли энергии связи. И даже если бы мы разогнали монетку до космических скоростей

в десятки тысяч километров в час, все равно связанная с этим движением энергия, приходящаяся на одну частицу, останется в миллиарды раз меньше внутриядерной. Легко себе представить, насколько трудно получить разрушающий ядро «снаряд». Он должен обладать энергией, достаточной, чтобы разбить ядро.

Итак, размышляя над тем, велики ли внутриядерные энергии, и проводя сравнение, мы всегда должны помнить, что в конце концов единственной мерой является энергия, приходящаяся на одну частицу.

Закончим обсуждение этого вопроса еще одним, последним сравнением. Сопоставим химическую и внутриядерную энергию. Это сопоставление дает весьма внушительные результаты: удельная (т. е. приходящаяся на одну частицу) энергия связи в ядрах превышает удельную химическую энергию примерно в миллион раз. Нужно ли поэтому удивляться, что никакими химическими методами нельзя вызвать (как это пытались делать алхимики) превращение одних элементов (т. е. по сути дела — ядер, так как именно состав ядра определяет строение атома и его химические свойства) в другие.

Да, сконцентрированные в ядрах энергии действительно огромны. Взаимодействия крепчайшим образом цементируют внутриядерные частицы. Об этом же можно сказать еще и так: если (по аналогии с электрическим зарядом) ввести ядерный заряд (обычно его называют не зарядом, а константой взаимодействия), то этот заряд окажется значительно больше электрического.

Новые факты, новые выводы

Рассказав о мезонном истолковании ядерных взаимодействий, мы не упомянули еще о целом ряде важных обстоятельств, которые существенно дополняют нарисованную нами картину. После того как Юкава предсказал новую частицу — мезон, экспериментаторы энергично взялись за ее поиски. Поиски сами по себе представляют интереснейшую главу науки. Достаточно сказать, что только при этих поисках было открыто целых пять частиц. Две из них, имевшие массу, в 207 раз превосходящую массу электрона, и обладавшие одна положительным, а другая отрицательным электрическим зарядом, были

названы мю-мезонами (они обозначаются μ^+ и μ^-). Некоторое время считалось, что это и есть юкавские мезоны. Однако μ-мезоны не проявляли никакой активности при взаимодействии с ядрами. Во всяком случае они в этом отношении не отличались от электронов.

Новые поиски привели к открытию пи-мезонов (π-мезоны; иногда их называют также пионами), которые по всем признакам подходили на роль переносчиков ядерного взаимодействия. π-мезоны оказались трех сортов: с положительным (π^+), отрицательным (π^-) электрическим зарядом и, наконец, нейтральные (π^0). Их массы настолько близки (273,1 электронной массы у первых двух и 264,1 у последних), что эти частицы по справедливости считаются не различными мезонами, а одним и тем же мезоном «в разных зарядовых состояниях».

Дальнейшие исследования значительно увеличили число известных нам частиц, переносящих, как и π-мезоны, взаимодействие. Эти новые частицы тяжелее π-мезонов, одни примерно в четыре, другие — в шесть, или же в еще большее число раз. Как мы теперь понимаем, из-за этого соответственно уменьшается радиус действия сил, обязанных обмену этими частицами. Картина взаимодействий к тому же усложняется еще и тем, что все мезоны испускаются очень часто, так что и протон, и нейтрон окружены плотным облаком из этих частиц (правильнее сказать, что облака эти являются составной частью частиц). Неудивительно, что полной количественной картины взаимодействий пока еще нет.

Однако многие важные закономерности уже подмечены. К ним, в частности, относится зарядовая независимость ядерных взаимодействий, т. е. одинаковость как протон-протонных, так и протон-нейтронных и нейтрон-нейтронных взаимодействий. Зарядовая независимость может рассматриваться как проявление того, что в переносе взаимодействия проявляются симметрично как положительные и отрицательные, так и нейтральные частицы.

Мы говорили выше только о притяжении между частицами в ядре, быстро убывающем при увеличении расстояния между ними. Но, по-видимому, и при

уменьшении расстояния это притяжение, пройдя через максимум, должно убывать, а затем превращаться в отталкивание. Этот эффект качественно объясняется в мезонной теории, если учесть обмен одновременно и векторными мезонами. Интересные и неожиданные выводы, касающиеся потенциала нуклонных взаимодействий, получены советским теоретиком Н. Н. Колесниковым. На основании большого экспериментального материала он пришел к выводу, что, по крайней мере, для взаимодействия между нуклонами и так называемыми Λ^0-частицами (это один из «гиперонов», о которых мы поговорим позже), во многом очень похожими на нуклоны, притяжение, по мере уменьшения расстояния, превращается в отталкивание, затем вновь наступает притяжение, а затем на очень малых расстояниях — опять, уже более значительное отталкивание. Детальный анализ нуклонного взаимодействия еще не завершен, хотя уже теперь ясно, что здесь важен многомезонный обмен.

Грустное примечание

«Как просто разрешается множество проблем физики ядра, если привлечь идею о мезонной природе ядерного взаимодействия» — так может подумать читатель.— «И короткодействие, и зарядовая независимость, и устойчивость, и многое другое — находят наглядное объяснение».

Наглядное — да. Именно ради наглядности мы и привели мезонную картину межнуклонных взаимодействий. Что же касается объяснения... Ведь объяснить — и притом количественно — значит построить теорию, а именно такого превращения «картинки» в теорию пока не произошло. Это конечно, не означает, что мы вообще не умеем количественно описывать ядра,— речь идет лишь конкретно о мезонной теории ядерных взаимодействий. Многое можно решать, вообще не вводя никаких «моделей» — так, например, существование стабильных ядер естественно объясняется тем, что их распад просто запрещен энергетически. Широко используется информация о взаимодействии нуклонов, получаемая из опытов по рассеянию этих частиц. Все больше мы узнаем о форме ядер, о процессах, происходящих в них, о методах теоретического описания этих процессов. Однако эти

методы далеко уступают в наглядности нашей «картинке», что и заставляет нас вновь обратиться к ней, понимая справедливость упреков, которые могут быть брошены нам строгими знатоками.

Барионный заряд

При изучении процессов в ядре нельзя обойти молчанием очень важного закона природы: протоны, нейтроны и все частицы тяжелее их (объединенные общим названием барионы) по одиночке не возникают, не уничтожаются и не превращаются в мезоны или более легкие частицы. Рождаться и уничтожаться могут только пары барион — антибарион. Об этом же можно сказать короче: *разность числа барионов и антибарионов в любой системе остается неизменной.*

Удобно ввести особое квантовое число—барионный заряд. Для каждого бариона он принимает значение +1, а для антибариона —1. Закон сохранения алгебраической суммы этих зарядов является одним из фундаментальных положений теории: разность между числом барионов и антибарионов остается неизменной, какие бы частицы ни возникали и ни исчезали в процессе взаимодействия.

3.

β-распад

Напомним, что нейтрон нестабилен. Каким же образом он может быть составной частью стабильных ядер?

Дело в том, что нестабилен свободный нейтрон. Поскольку он тяжелее протона (а ведь масса пропорциональна энергии — напомним знаменитую формулу Энштейна $E=mc^2$), свободному нейтрону «энергетически выгодно» превратиться в протон. Когда же нейтрон и протон находятся в ядре, возникает еще энергия взаимодействия. Энергия ядерного притяжения (как и любого притяжения) отрицательна. Энергия же электрического отталкивания протонов положительна. Превращение нейтрона в ядре в протон не высвобождает энергии, а требует ее затраты. По этой

причине число нейтронов, по крайней мере в не слишком тяжелых ядрах, остается неизменным.

По выражению К. Форда, «нейтрон черпает свою стабильность в энергии связи с протоном. Речь идет об очень тонком балансе». И далее: «Кажется почти чудом, что природа вместо одного получила в свое распоряжение 90 различных кирпичей мироздания» (автор имеет в виду примерное число устойчивых ядер).

Но всегда ли может быть обеспечена устойчивость нейтронов в ядре? Оказывается, не всегда. Ведь нейтрон тяжелее протона менее чем на 1/1000 его массы. Поэтому, если доля нейтронов становится слишком большой, даже спасительное взаимодействие не сможет удержать нейтроны от распада. «Избыточному» нейтрону становится энергетически более выгодно превратиться в протон (после чего пропорция частиц в ядре становится более устойчивой). При этом порождаются и вылетают из ядра электрон и другие частицы, о которых будет подробно говориться в следующей главе,— в этом и состоит β-распад.

Возможна и обратная ситуация: в ядре содержится «избыточное» число протонов. Поскольку, из-за взаимодействия в ядре, разница в массах протонов и нейтронов перестает играть решающую роль, эти частицы приобретают здесь значительное равноправие. Оно проявляется, в частности, и в том, что при соответствующих условиях протон может стать неустойчивым и распадаться, подобно нейтрону.

Разница, конечно, имеется: нейтрон, распадаясь, испускает отрицательную частицу — электрон. Протон же испускает положительную частицу — позитрон. При позитроном β-распаде один («лишний») протон превращается в нейтрон, что обеспечивает восстановление устойчивой нормы частиц в ядре.

α-распад

Обратимся теперь к рассмотрению α-распада. Это явление, обнаруженное (как и β-распад) в конце прошлого века Беккерелем, стало вскоре предметом внимательного экспериментального изучения. В первую очередь здесь нужно отметить работы Марии и Пьера Кюри, а также Резерфорда и целого ряда других ученых. Вот что они обнаружили. При α-распаде

из ядра вылетает частица, уносящая положительный заряд, равный двум (в электронных единицах), и массу, почти точно вчетверо большую, чем у протона. По всем признакам α-частица — это просто ядро гелия, т. е. пара протонов и пара нейтронов, тесно спаянные воедино.

Почему же происходит α-распад? Почему он присущ только тяжелым ядрам? Почему одни ядра распадаются очень быстро, в то время как другие, прежде чем выбросить α-частицу, существуют миллиарды лет? Вот самые первые вопросы, над которыми приходится здесь задумываться.

Прежде всего укажем на бросающееся в глаза различие между β- и α-распадом. Если в первом из ядра вылетают частицы, которых там раньше не было и которые, следовательно, должны были возникнуть, родиться в самом процессе, то при α-излучении ядро выбрасывает явно какую-то свою составную часть.

Существует ли α-частица, так сказать, в готовом виде, как единое целое внутри ядра, или два протона и два нейтрона «слипаются» непосредственно перед вылетом? Скорее всего второе,— такова наиболее распространенная точка зрения (хотя иногда высказывается и обратное мнение). Но несомненно одно: α-частица — исключительно компактная, устойчивая, крепко сцементированная система и возникает она (непосредственно ли перед испусканием или раньше) внутри ядра.

Какие же силы выталкивают α-частицу? Конечно, она несет электрический заряд, причем того же знака, что и все ядро, и, следовательно, между ядром и α-частицей должно существовать отталкивание. Но внутри ядра оно значительно перекрывается мощным ядерным притяжением. Ведь если бы этого не было, как уже говорилось, все ядра должны были бы разлететься на составные части.

Прыжок через стенку

Однако, если силы притяжения больше, чем отталкивания, каким образом вообще может произойти распад? Здесь мы опять стоим перед специфически квантовым эффектом. Может ли лежащая в кастрюле картофелина сама собой выпрыгнуть из нее? Конечно, нет,— ведь у этой картофелины

недостаточно энергии, чтобы подняться до краев кастрюли. Не может, раздвинув ваши пальцы, вырваться из рук карандаш,— ему также мешает удерживающее его усилие. Но карандаш и картофелина — классические, большие или, повторяя уже известный вам термин, макроскопические объекты, состоящие, из огромного числа частиц. А в α-частице всего два протона и два нейтрона. Значит, корпускулярно-волновой дуализм и вытекающее из него соотношение неопределенностей должны сказываться очень сильно. α-частица тоже в известном смысле находится в сосуде. Этим сосудом является ядро. Следовательно, должна существовать неопределенность импульса и разброс энергий. Это выглядит примерно так, возвращаясь опять к примеру с картофелиной, как если бы ее все время трясли, подталкивали, одним словом, двигали. При этом вполне возможно, что в какой-то момент кинетическая энергия возросла бы настолько, что стал возможным прыжок через стенку.

Нельзя, конечно, переносить это буквально на ядро. Никакой стенкой, никаким забором оно не окружено. Здесь за счет разброса энергии появляется возможность вырваться из плена ядерных притяжений и вылететь за пределы ядра. И как только это произошло, как только α-частица «переступила порог ядра», силы притяжения резко падают,— ведь они короткодействующие. И здесь господствующими становятся электрические силы отталкивания, которые убывают гораздо медленнее. Они буквально отшвыривают α-частицы от ядра, разгоняя их до очень больших энергий. Вот почему α-частицы летят со столь огромными скоростями.

Что упущено?

В наших рассуждениях есть одно туманное место. Почему из ядра вылетает α-частица, а не один, скажем, протон? *) Ведь все рассуждения относительно неопределенности импульса и разброса энергии применимы и к этому случаю. Что-то очень существенное выпало, очевидно, из наших рассуждений. Попытаемся разобраться, что именно.

*) Не так давно советскими физиками обнаружен и протонный распад ядер. Однако это исключительно редкое явление.

Разброс энергии в пересчете на одну частицу и в том и в другом случае одинаков. Силы отталкивания? Поскольку в α-частицах два нейтрона, т. е. половина системы не имеет заряда, отталкивание в «чисто протонном» в .ражении даже вдвое больше. И если все-таки выбрасываются не протоны, а ядра гелия, то причиной, очевидно, может быть лишь одно: связи, удерживающие в ядре одну частицу — протон,— больше чем те, которые удерживают α-частицу.

Насыщение ядерных сил

Обратимся к простой модели, которая поможет нам пояснить суть дела. Представьте себе набор шариков, от каждого из которых отходят четыре нити. Будем связывать их вместе, стараясь использовать все нити. Вот один из способов соединения шариков (I). Это, так сказать, пример равномерных связей: все шарики находятся в равных условиях. Легко сообразить, что вырвать из получившейся цепочки любую группу шариков не легче (т. е. нужно порвать не меньше нитей), чем один.

Но вот другая схема соединения (II). Теперь картина существенно изменилась: для того, чтобы вырвать один шарик (так и хочется сказать: одну частицу), по-прежнему нужно разорвать четыре нити. И в то же время появилась группа, связанная с остальной системой всего двумя нитями. Заметьте, что сама эта группа очень устойчива: в ней появилась «дополнительная связь» — еще одна внутренняя ниточка.

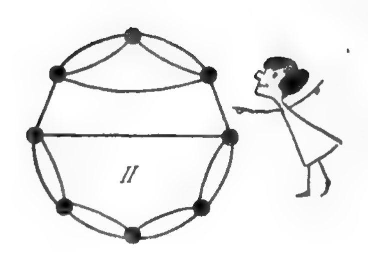
Именно эта акцентировка внутренних связей ослабляет внешние соединения группы с остальными шариками системы.

Можно, наконец, нарисовать еще две схемы, на которых это обстоятельство отражается предельно резко: здесь усиление внутренних соединений приводит к полному разобщению групп. Все ниточки пошли на внутренние соединения, так что на «внешние связи» ничего не осталось.

Налицо очевидно положение: чем крепче связи внутри определенной группы шариков, тем меньше нитей связывает их с остальными и тем легче, следовательно, вырвать эту группу из системы.

Конечно, ничего подобного не будет, если к нашему шарику можно было бы привязывать сколько





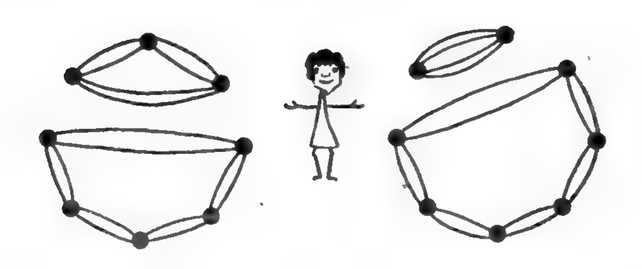
угодно нитей. Дело, стало быть, в том, что каждый шарик способен прикрепляться к *ограниченному числу* своих соседей.

Это последнее обстоятельство чрезвычайно существенно и заслуживает того, чтобы его подчеркнуть. Ведь если нечто подобное проявляется в ядрах, то мы напали на интереснейшую особенность ядерных сил.

Но, может быть, мы ищем аналогии там, где их нет? Многие факты, однако, убеждают, что такая аналогия может быть проведена и притом это будет самая близкая аналогия.

Прежде всего α-частица, — несомненно, очень тесно спаянная частица. Ведь недаром она сама как некий монолитный снаряд часто применяется для бомбардировки других ядер. Не может ли именно эта монолитность являться причиной сравнительно слабого притяжения со стороны остальных внутриядерных частиц?

Нельзя ли, как и в модели с шариками, представлять себе, что каждый протон или нейтрон активно взаимодействует лишь со сравнительно небольшим



количеством окружающих его частиц? Есть для этого основания? Есть! Собственно, мы уже пришли к этому раньше, когда обсуждали β-распад. Вспомните, там говорилось, как тонко должно быть сбалансировано соотношение между числом протонов и нейтронов в ядре, чтобы оно оказалось устойчивым. На каждый протон в устойчивом ядре приходится приблизительно один-два нейтрона (в легких ядрах — меньше, в тяжелых — больше). «Игра» ядерных притяжений и электростатических отталкиваний между нуклонами — таким общим названием объединяются частицы, из которых построены ядра — обуславливает некоторое, вполне определенное, распределение этих нуклонов в ядре, при котором каждый из нуклонов испытывает влияние только своих ближайших соседей. Почему ближайших? Да просто потому, что ядерные силы, как мы уже знаем, «чувствуются» лишь на очень малых расстояниях. У физиков принято говорить об этом как о явлении насыщения ядерных сил.

О существовании насыщения говорит и еще один интересный факт, известный как закон примерного постоянства ядерной плотности. Экспериментаторы установили, что размер ядер растет как корень кубический из общего числа заключенных в них частиц. Иными словами, объем (пропорциональный кубу радиуса) увеличивается прямо пропорционально этому числу. Объем, приходящийся на каждую частицу, следовательно, во всех ядрах практически остается одним и тем же. Попробуем дать этому объяснение. Представьте себе, что соединятся два ядра — о таком слиянии нам еще придется поговорить подробнее. Если бы все частицы взаимодействовали со всеми, при таком соединении должна была бы произойти «усадка». Частицы оказались бы за счет возросшего притяжения спрессованными теснее, чем раньше. Но этого не происходит — объем, отведенный каждой частице, не уменьшается. Значит, большинство частиц (практически все, кроме находящихся на стыке) не почувствует никакого изменения взаимодействий. Это как раз и объясняется тем, что для действующих на них сил уже наступило насыщение, и появление поблизости новых частиц ничего не прибавляет к этим силам.

Теперь, когда мы познакомились с явлением насыщения и когда выясняется правомерность аналогии с рассмотренной только что моделью, нам открывается путь к пониманию наиболее существенных особенностей α-распада.

Например, хорошо известно, что «более охотно» α-распадаются относительно тяжелые, состоящие из многих частиц ядра. Дело, очевидно, просто в том, что при малом числе частиц насыщение в полной мере еще не сказывается.

Нетрудно нам теперь ответить и на вопрос, с которого мы начинали: почему из ядер чаще всего вылетает группа из четырех частиц — двух протонов и двух нейтронов, а не отдельные частицы? Мы ведь теперь убедились, что из-за слипания протонов и нейтронов в α-частицу уменьшаются их связи со всем остальным окружением. А стоит этому случиться, как обусловленного принципом неопределенностей разброса энергии оказывается вполне достаточно, чтобы произошел α-распад.

Итак, мы разобрались в двух типах ядерной неустойчивости. Нам осталось еще добавить несколько слов о третьем типе — делении ядер.

Деление ядер

Как видно уже из самого названия, деление — это не испускание ядром какой-то маленькой группы частиц, как это было в предыдущих случаях, а «развал» ядра почти на равные части. Делиться могут только очень тяжелые ядра, в состав которых входит более 250 частиц. Это само уже дает ключ к пониманию процесса. Мы знаем теперь, что ядерные силы чувствуются только на очень малых расстояниях, знаем о насыщении, и нам нетрудно представить себе, что произойдет в ядрах, в которых частиц такое огромное количество. Различные части ядер при этом должны жить почти совершенно автономно. Расположенные на противоположных краях, частицы практически почти не связаны. Стоит только немного «встряхнуть» такое ядро — и оно разваливается пополам. Так от малейшего толчка, даже просто под действием собственного веса разваливается кусок глины, так разбивается пополам, даже от легкого сотрясения, большая капля ртути. (Заметьте, что

маленькие капли, маленький комочек глины гораздо прочнее.) Это, во всяком случае с качественной стороны, кажется таким простым и наглядным, что можно было бы и закончить рассказ о делении, если бы не одно очень существенное обстоятельство. Взглянув на таблицу ядер (а ею фактически может быть менделеевская таблица), мы сразу же обнаружим, что масса ядер растет от элемента к элементу быстрее, чем заряд. Другими словами, количество протонов в ядрах увеличивается медленнее, чем число нейтронов.

Совсем нетрудно понять причину этого. У электрических сил отталкивания отсутствует насыщение. Каждый протон взаимодействует со всеми остальными, сколько бы их ни было (здесь сказывается и то, что кулоновские силы чувствуются и на больших расстояниях). По мере возрастания числа протонов силы отталкивания становятся все более значительными. Скомпенсироваться они могут только за счет появления в ядре все большего и большего количества нейтронов, не чувствующих электрического отталкивания и в то же время вносящих свою долю в ядерное притяжение. Чтобы это притяжение могло расти быстрее электрического отталкивания, прослойка нейтронов должна становиться от ядра к ядру все значительнее. Ведь каждый протон (насыщение ядерных сил!) притягивается отнюдь не всеми, а только ближайшими к нему частицами. Естественно поэтому, что по мере увеличения числа частиц в ядре удельный вес нейтронов должен непрерывно возрастать.

А теперь представьте себе, что произошло деление какого-то тяжелого ядра. Например, ядра изотопа урана-239 с 92 протонами и 147 нейтронами. Будем, простоты ради, считать, что это ядро разделилось примерно пополам. Тогда в каждом из осколков должно быть по 46 протонов и 73—74 нейтрона. Количество протонов, а значит и заряд ядра (в электронных единицах), совпадает с номером элемента в менделеевской периодической системе. Следовательно, осколки являются ядрами палладия. Но самый устойчивый изотоп палладия имеет в ядре 61 нейтрон. Куда же денутся лишние 12—13 нейтронов, приходя-

щиеся на каждый из осколков? Конечно, они могут за счет β-распада превратиться в протоны. Однако, поскольку деление происходит очень быстро, успевает произойти нечто еще более простое (конечно, простое только по внешности). Часть лишних нейтронов просто выбрасывается, становится свободной. Это-то высвобождение нейтронов позволяет существовать тому, что известно под названием цепной реакции.

Действительно, если собрать вместе некоторое количество делящихся ядер, то рано или поздно под действием каких-либо внешних факторов, а порой и самопроизвольно одно из них распадается на осколки. Вылетающие при этом нейтроны беспрепятственно (ведь они не испытывают электрического отталкивания) влетают в соседние ядра и вызывают их незначительную, но все же достаточную, чтобы они в свою очередь разделились, встряску. Новые деления вызывают поток новых нейтронов, и процесс лавиной нарастает, очень быстро, как огонь солому, охватывая все делящиеся ядра *).

И поскольку при каждом делении осколки приобретают огромные энергии — электрическое отталкивание с колоссальной силой отбрасывает их друг от друга — в делящемся веществе очень быстро выделяется большое количество энергии, уносимой электромагнитным и другими излучениями, а также много тепла, которое может быть использовано. Миллионы людей на Земле борются за то, чтобы использовать это на благо жителей нашей планеты.

Между прочим, это техническое использование ядерного деления в одном пункте родственно применению... колеса. Ведь ни то, ни другое подсмотреть в природе невозможно.

Мы очень сильно уклонялись бы от нашей основной задачи, если бы стали подробно рассказывать, например, о промышленных установках, в которых используется энергия, освобождающаяся при деле-

*) Мы, разумеется, несколько схематизировали цепную реакцию деления. В действительности не все нейтроны захватываются делящимися ядрами, а захваченные не всегда вызывают деление.

нии ядер, о ядерных реакторах, о ядерной энергетике вообще. Но коль скоро мы заговорили о ядерных источниках энергии, нельзя не сказать о так называемых термоядерных реакциях.

Когда ядра сливаются

Человек с незапамятных времен использует энергию, выделяющуюся в реакциях слияния, соединения. С тех пор, как он научился пользоваться огнем. Но это — химическое «слияние»: соединение атомов кислорода с атомами и молекулами горючего. Почему здесь выделяется энергия? Почему, например, таким жарким пламенем горит (а иногда и взрывается) смесь водорода и кислорода? Да просто потому, что у атомов кислорода и водорода, взятых в отдельности, энергия больше, чем у молекул воды, которые образуются при их соединении. Эта-то разница в энергии и освобождается, выделяется при горении.

Легко убедиться в возможности аналогичного «ядерного горения». Для этого нужно только проанализировать, при каких условиях может происходить слияние ядер.

Проще всего, на первый взгляд, добиться слияния нейтронов. Ведь между ними действуют только силы притяжения. Но нейтроны невозможно хранить, они проникают через любые стенки (или поглощаются в их толще), да, кроме того, нельзя забывать и об их нестабильности. Слияние двух протонов также вряд ли стоит обсуждать. Слишком большую роль играет здесь электрическое отталкивание. А вот ядра дейтерия (тяжелого водорода) — дейтоны находятся в совсем ином положении. Они стабильны. Это устойчивая система из одного протона и одного нейтрона. Но еще более устойчиво ядро гелия, которое должно получиться при слиянии двух дейтонов. Недаром при радиоактивном распаде вылетают именно α-частицы, а не дейтоны.

Читатель легко проведет необходимые оценки, если только у него под руками есть достаточно точные таблицы масс различных ядер. Находим в этих таблицах массу дейтона $m_D = 2{,}0141$ (в атомных единицах). При слиянии должен образоваться гелий. Массу ядра гелия $m_{He} = 4{,}0026$ нужно сравнить с массой двух дей-

тонов. Поскольку m_{He} меньше чем $2m_D$, то интересующий нас процесс энергетически выгоден, т. е. два дейтона, столкнувшись, действительно могут слиться. При этом должна освободиться энергия (и немалая, нужно добавить), подобно тому, как она выделяется при любом химическом слиянии.

А как же электрическое отталкивание? — спросит читатель. Разумеется, оно существует. Больше того, из-за этого отталкивания очень трудно сблизить два дейтона. Но если все же удается преодолеть электрические силы (а они начинают сказываться уже на больших расстояниях) и свести дейтоны настолько близко, что в игру вступают короткодействующие ядерные притяжения, то они совершенно подавляют отталкивание.

Важно, таким образом, сблизить дейтоны — и если это удастся, затраченная работа окупится буквально сторицей. Но как это сделать, как сблизить дейтоны?

Один из способов — нагреть тяжелый водород до температур в десятки миллионов градусов. При таких температурах энергия теплового движения становится достаточной, чтобы преодолеть броню электрических сил. Ядра при соударениях сближаются настолько, что мезонные взаимодействия успевают сковывать их. Происходит термоядерная реакция — слияние за счет сверхвысоких температур. И, как уже говорилось, при этом выделяются огромные энергии, отчего температуры становятся еще больше. Процесс ядерного горения становится самоподдерживающимся, пока не иссякнет топливо.

Термоядерные процессы в природе совсем не представляют собой чего-то редкого и исключительного. Горение всех звезд, в частности нашего Солнца, обязано термоядерному слиянию. Правда, здесь картина несколько сложнее. Она не сводится просто к образованию гелия из дейтонов. В реакции вовлекается целая цепочка ядер, однако принципиальная сторона дела от этого не меняется.

Нам остается добавить к сказанному еще несколько слов. Слияние каких ядер возможно? Конечно, в основном легких: ведь чем больше в ядре протонов, тем труднее преодолеть электрическое

отталкивание. Но есть и еще одно, более важное обстоятельство. У слишком тяжелых ядер начинает сказываться явление насыщения ядерных сил, и тогда слияние невозможно. Причем роль насыщения ядерных сил здесь очень напоминает роль насыщения химических сил при образовании молекул, о чем мы говорили в свое время. Таким образом, выбор топлива не вызывает больших колебаний.

Мы еще не умеем осуществлять управляемую термоядерную реакцию. Над этим настойчиво работают крупнейшие научные учреждения. Обуздать термоядерную реакцию — значит практически навсегда решить достаточно актуальную проблему энергетических ресурсов человечества.

Что мы узнали!

Теперь, пожалуй, можно заканчивать рассказ о ядерных силах. Мы выяснили много важного и интересного. Прежде всего, в буквальном смысле этого слова о силах в ядре говорить нельзя. Ведь сила — это чисто классическая, неквантовая величина, равная произведению массы на ускорение. Корпускулярно-волновой дуализм приводит к невозможности точного задания координаты и скорости, а, значит, и ускорения. Следовательно, ни о каких силах в механическом смысле в микромире говорить не приходится. Здесь другие мерила взаимодействия. Самым простым из них является средняя энергия связи. Вспомните соотношение неопределенностей для энергии и времени. Устойчивые ядра существуют практически как угодно долго. Значит, для них неопределенность времени можно считать бесконечно большой. Но тогда неопределенность энергии (заметьте — для всего ядра, а не для составляющих его частиц!) должна быть бесконечно малой. Ведь эти неопределенности обратно пропорциональны друг другу. Именно отсутствие разброса энергии и позволяет сохранить и для чисто квантового объекта, каким является ядро, энергию как характеристику взаимодействия.

Мы показали, что взаимодействие возникает в результате обмена промежуточными частицами. Оценив массу последних, мы пришли к мезонной картине взаимодействия.

Далеко не все еще понятно в этой картине, хотя некоторые качественные детали ядерного взаимодействия уже проясняются.

Она естественно поясняет так называемую зарядовую независимость (т. е. независимость ядерных сил, действующих на частицу, от того, несет ли она электрический заряд): дело здесь просто в том, что и у переносчиков взаимодействия могут быть как положительные, так и отрицательные заряды (может также и вовсе отсутствовать заряд).

Но нам удалось пойти еще дальше: объяснить основные черты β- и α-распада, разобраться в реакциях деления и слияния ядер. Наши возможности еще не исчерпаны.

Можно, например, опираясь на полученные результаты, сразу же указать, что π-мезоны как переносчики ядерного взаимодействия не являются монополистами (хотя они и играют заметную роль). Переносить взаимодействие могут любые кванты, которые способны испускаться и поглощаться ядерными частицами. И чем тяжелее эти кванты, тем меньше радиус соответствующих сил. В качестве примера можно указать на так называемые *K*-мезоны, открытые сравнительно недавно. У них примерно в 970 раз бóльшая масса, чем у электронов (это более чем в три раза превышает массу π-мезона), и, значит, переносимые нашими частицами взаимодействия должны сказываться на расстояниях втрое меньших, чем π-мезонные *).

Есть и еще одна чрезвычайно важная проблема, которую нельзя не отметить, когда рассматривается вопрос о ядерных силах. Вот мы говорили: протон испускает π-мезон, поглощаемый соседним нейтроном. А почему, собственно, только соседним? Ведь сам протон превращается при этом в нейтрон, который ничуть не хуже всех окружающих,— значит, он и сам может захватить собственный мезон. Аналогич-

*) Роль *K*-мезонного взаимодействия особенно существенна в так называемых гипер-ядрах (о них несколько слов было уже сказано), т. е. ядрах, в состав которых кроме протонов и нейтронов входят и гипероны — сверхтяжелые частицы с массами примерно в 2200, 2300, 2600 электронных масс.

ный процесс возможен и у нейтрона *). В результате должно возникать взаимодействие — только не с другими частицами, но и с самим собой, подобное электромагнитному самодействию. Особенно важно, что и протон и нейтрон должны, в соответствии с такой картиной, рассматриваться как некая очень сложная система: в центре «нечто», какая-то сердцевина, а вокруг — облако непрерывно испускаемых и вновь поглощаемых мезонов. (Заметим, кстати, что взаимодействие различных частиц можно рассматривать как частичное смешивание таких облаков.) Мезоны заряжены — значит можно ставить вопрос о распределении электрического заряда в этом облаке. Но ведь это шаг к выяснению *структуры* элементарных частиц! А еще вчера слово «элементарный» для многих было синонимом «бесструктурный». И слова о структуре частиц — это не только домыслы теоретиков. В замечательных опытах Хофштадтера, уже упоминавшихся в нашей книге, эта структура была нащупана экспериментально. Это ли не прекрасное подтверждение правильности теории?

Белые пятна

Чему же в таком случае приписать те слова о «белых пятнах», с которых мы начинали эту главу? Казалось бы, успехи теории так велики и бесспорны. Не только объяснены ядерные взаимодействия, нам даже удалось «заглянуть» внутрь частиц! Да, все это удалось — и о многом мы еще здесь не имели возможности упомянуть,— но удалось только в пределах качественного описания. Качественно, но увы, не количественно!

Как только физики пытаются перевести все приведенные рассуждения на строгий язык уравнений и формул, сразу же возникает целый лес трудностей, многие из которых (да почти все) еще не удалось преодолеть. Есть и такие пункты, в которых теория пока не может похвалиться даже качественным описанием.

Не знаем мы и много других, гораздо более простых, на первый взгляд, вещей. Нам даже не очень

*) Из сказанного, в частности, следует, что резкой грани между протоном и нейтроном нет. Их скорее нужно рассматривать как различные состояния одной и той же частицы (физики говорят: зарядовые состояния).

хорошо известны формы различных ядер, расположение в них частиц.

Впрочем, в описании структуры, а значит, и формы ядра достигнут значительный успех.

Ядра (во всяком случае тяжелые ядра) — это системы из многих очень сильно друг с другом взаимодействующих частиц. Теоретикам справляться с такими системами нелегко. Приходится строить приближенные теории. Одной из первых таких теорий была капельная (или гидродинамическая) теория Нильса Бора. Ядро во многом похоже на каплю. Молекулы в жидкости связаны короткодействующими силами; мал радиус действия и сил притяжения частиц в ядре (хотя природа их совсем иная). Но это еще не все.

В жидкости на одну молекулу (как и в ядре на один нуклон) приходится всегда примерно один и тот же объем. Сходство внешнего рисунка взаимодействий делает гидродинамический подход к ядру очень заманчивым и, как оказалось, плодотворным. Капельная модель удобна при описании деления ядер, полезные формулы получаются и для колебаний ядер-капель, т. е. перехода к возбужденным состояниям. Но, разумеется, гидродинамический подход в ряде случаев слишком грубо отражает свойства ядер. В частности, вопрос о форме ядер в гидродинамическом подходе решается однозначно: невозбужденная капля сферически симметрична. На самом деле это очень неточная модель.

Следующий шаг в теории ядра связан с так называемой оболочечной моделью. Вы помните, что электроны в атомах располагаются слоями, оболочками, каждая из которых имеет определенную энергию, магнитный и механический моменты и т. д.

Оказывается, в рамках разумных приближений можно ввести представления об оболочках и в ядрах.

Ядро, как уже говорилось, — многочастичная система с чрезвычайно сложными внутренними связями, к тому же меняющимися каждое мгновение. Но именно такие системы описываются с помощью усредненных величин. Подумаем теперь, каким же является усредненное воздействие на каждую частицу. В толще ядра каждая частица испытывает

в среднем одинаковое воздействие со всех сторон (сказывается влияние лишь ближайших соседей!), так что эти воздействия взаимно компенсируются. На границе же появляются силы, направленные внутрь ядра. Получается, что каждая частица находится как будто в яме, по дну которой она может беспрепятственно перекатываться, но стенки которой не выпускают ее наружу. Если теперь по всем правилам квантовой теории решить задачу о движении частиц в «потенциальной яме», учитывая принцип Паули, то получится, что нуклоны должны располагаться в ядре некоторыми оболочками.

Оболочечная модель во многом богаче капельной. Однако эти две модели нужно не противопоставлять друг другу, а рассматривать как взаимодополняющие.

Из оболочечной теории следует, что наиболее устойчивы ядра, у которых полностью «укомплектовано» целое число оболочек. К их числу относится, например, α-частица, ядро кислорода O_8^{16} и др. Но вот, скажем, ядро O_8^{17}. В нем появился один «лишний» нейтрон. Он может прилепиться лишь где-то поверх заполненных оболочек. Но и оболочки не останутся неизменными — ведь они оказались в сфере воздействия новой, причем движущейся частицы. Получается сложная картина, в которой переплетаются черты и оболочечной, и капельной моделей.

Что же касается формы, то после всего, что только что было сказано, становится ясным, что она, вообще говоря, очень сложна. Как показал А. С. Давыдов, форма ядер существенно сказывается на их свойствах и может быть изучена весьма досконально.

Наиболее интересным следствием, вытекающим из оболочечной модели ядра, является предсказание возможности существования относительно стабильных сверхтяжелых ядер.

Числа протонов или нейтронов в целиком заполненных ядерных оболочках принято называть «магическими» числами.

К «магическим» числам в периодической системе Менделеева относятся числа 2, 8, 20, 50, 82, 126. Особо прочными являются ядра с целиком заполненными, как протонными, так и нейтронными, оболочками.

Таким «дважды магическим» ядром является, например, ядро свинца с числом протонов $Z=82$ и числом нейтронов $N=126$. В конце 60-х годов рядом ученых было теоретически показано, что следующее за свинцом «дважды магическое» ядро должно содержать 114 протонов и 184 нейтрона. Расчет, нуждающийся, конечно, в дальнейших уточнениях, показал, что такое ядро сравнительно стабильно по отношению к делению, α- и β-распаду. Приблизительная оценка времени жизни этого ядра дает 10^5-10^8 лет, т. е. очень и очень много. Сравнительно долго должны жить и ядра с близкими числами нейтронов и протонов. И это при условии, когда полученные искусственно гораздо более легкие трансурановые элементы живут очень мало и время их жизни падает с увеличением заряда ядра. Так, менделевий ($Z=101$) живет около 1000 *сек*, а курчатовий ($Z=104$) — всего лишь половину секунды. Только у 105-го элемента время жизни оказывается немного больше, чем у 104-го элемента. В основном все эти ядра разрушаются вследствие деления. Таким образом, относительно стабильные сверхтяжелые ядра отделены от сравнительно легких устойчивых ядер областью нестабильности и образуют как бы «острова» стабильности. За «островом» стабильности в окрестности $Z=114$ лежит другой «остров», образованный ядрами с зарядом $Z=126$.

Перед учеными стала задача получения этих сверхтяжелых ядер искусственно или отыскания их в природе. Получить ядра с $Z=114$ или $Z=126$ можно при столкновениях двух тяжелых ионов. Эти ионы должны обладать достаточно большой энергией, которую им сообщают с помощью ускорителей. Однако возникающее после слияния двух ядер новое ядро будет находиться в возбужденном состоянии. Кроме того, оно окажется в первый момент сильно деформированным и обладающим большим вращательным моментом. Вследствие этих причин его устойчивость будет значительно ниже, чем у невозбужденного ядра, и вероятность распада ядра будет велика. Неудивительно поэтому, что все попытки получения сверхтяжелых стабильных ядер с помощью ускорителей к успехам пока не привели.

Делались попытки отыскания ядер из «островов» стабильности в минералах на Земле, Луне и в метеоритах. Велись также поиски в тяжелой ядерной компоненте космических лучей. В середине 1976 г. сначала в газетах, а затем и в научных журналах появилось сообщение о том, что группе американских ученых удалось в микроскопических кристаллах монацита обнаружить ядра с зарядами 116, 124 и 126. Эти ядра не могли не обладать большими временами жизни, так как они миллионы лет покоились в земной коре. Но, увы, эта сенсация, как и многие другие, оказалась ложной. Строгая проверка не подтвердила существования сверхтяжелых элементов.

Тем не менее в настоящее время продолжают вестись работы по синтезу сверхтяжелых элементов. Рассчитаны конфигурации электронных оболочек этих элементов, с тем чтобы можно было предсказать их химические свойства. Знание химических свойств элементов окажет большую помощь при их идентификации.

Читатель, вероятно, заметил, что все рассуждения о структуре ядра абсолютно не затронули мезонной теории ядерных сил.

Полной динамической теории, опирающейся на детальный анализ физической картины взаимодействий, пока не существует.

Здесь и простирается та область «белых пятен», которую с огромной энергией штурмует армия ученых.

И первые, очень существенные успехи уже есть. Мы уже знаем, что нарисованная нами качественная картина — пусть приближенно — соответствует реальной действительности. Появляются и количественные теории. Иногда они строятся в русле теперь уже привычных квантово-полевых представлений, иногда делается попытка найти какой-то новый подход, опирающийся на дополнительные гипотезы.

И можно не сомневаться, что каждый существенный шаг в физике ядерных сил будет одновременно шагом к более полному ответу на основной вопрос физики: как устроено вещество.

Глава шестая

СЛАБЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Там вдумчивые взгляды
Ведут неверный мост
Сквозь созиданья и распады
От атома до звезд.

Э. Верхарн, «Исследования»



1. *Распад элементарных частиц и нейтрино.*
2. *Константа взаимодействия и превращения элементарных частиц.*
3. *Нейтрино и эволюция Вселенной.*

1.

Заповедник фантастов

Есть немало научно-фантастических книг, авторы которых наделяют своих героев умением «выключать» различные силы. В таких книгах фигурируют «гравитационные экраны», через которые не чувствуется тяготение, лучи, разрывающие химические связи, аппараты, уничтожающие трение, и т. д.

Но, пожалуй, никто еще не попытался представить себе, каким был бы мир без слабых взаимодействий.

А здесь есть где разыграться фантазии.

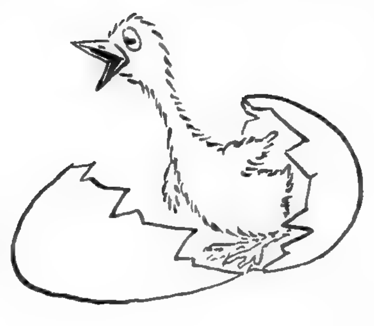
Слабые взаимодействия недаром называются еще и «распадными». Распад почти всех неустойчивых частиц (мы о нем уже упоминали, когда обсуждали взаимные превращения частиц друг в друга) связан именно с ними.

Значит, если бы по мановению какой-то волшебной палочки эти взаимодействия могли исчезнуть, сразу прекратились бы очень многие из известных нам типов превращений частиц. И нейтроны, и многие мезоны, и гипероны сделались бы устойчивыми и могли бы существовать как угодно долго.

К каким бы только чудесам это ни привело! Вот, например, периодическая система элементов. В ней сегодня, сто шесть клеточек — сто шесть химических элементов зарегистрировано учеными.

А почему не больше? Существуют ли элементы с номерами 2000, 10 000 и т. д.?

Таких элементов нет, и более того, мы уверены, что они никогда не появятся в клетках менделеевской таблицы *).



*) Мы не касаемся здесь пока вопроса о гигантских образованиях из нейтронов — нейтронных звезд, о которых речь пойдет ниже.

Причина этого, надо полагать, понятна всякому, кто внимательно читал предыдущую главу этой книги.

Ведь номер элемента совпадает с количеством протонов в его ядре. Чем больше это количество, тем больше стремящиеся разорвать ядро кулоновские силы. Компенсировать их способна только очень значительная нейтронная прослойка, ничего не прибавляющая к силам отталкивания, но цементирующая ядро силами мезонного притяжения.

Казалось бы, разбавив протоны достаточным количеством нейтронов, можно побороть кулоновскую неустойчивость в любом из ядер. Но здесь приходится вспомнить о нестабильности нейтронов... Как только их становится слишком много, появляется вероятность β-распада, которая становится тем больше, чем значительнее относительная доля нейтронов в ядре.

Итак, ядра (с $Z \approx 100$) не могут быть устойчивыми. Это хорошо известное обстоятельство приводит, в частности, к тому, что очень тяжелые элементы приходится, собственно, не открывать, а изготовлять. В готовом виде ни в недрах земли, ни в атмосфере, ни в глубинах океана таких элементов не найдешь. Для этого они слишком недолговечны. Ученым приходится применять обстрел ядер быстрыми ионами, следить за цепью сложных ядерных превращений, прежде чем чувствительнейшие приборы успеют в какое-то короткое мгновение зарегистрировать новый элемент, образующийся в невообразимо малых количествах, порой исчисляемых отдельными атомами.

Ну, а если бы распада нейтронов не было, если бы эти частицы, повинуясь нашей волшебной палочке, стали устойчивыми? Ведь тогда ничто не мешало бы наращивать их число. Менделеевская таблица значительно пополнилась бы. Правда, не до бесконечности, как кажется на первый взгляд. Вспомним о насыщении ядерных сил. Ядра-гиганты были бы очень непрочными и легко рассыпались бы на части. Но в какой-то степени можно «защищаться» от деления, приняв специальные меры против появления толчков и встрясок. Возможно, читателю после всего сказан-

ного представится такая картина: на двери лаборатории надпись: «Внимание, слабые взаимодействия выключены». На лабораторном столе под непрозрачным колпаком (чтобы исключить «встряску» светом) аморфное тело величиной с яблоко, плавающее в жидком гелии (ведь температуру тоже нужно сделать как можно ниже, чтобы предельно ослабить тепловые толчки). Впрочем, о плавании говорить не приходится: тело невообразимо тяжело, оно весит почти миллион тонн — и не разваливается на части под действием собственного веса, по-видимому, исключительно из гуманных соображений. Ведь стоит появиться в «яблочке» трещине в миллиардную долю миллиметра толщиной, как ядерные (короткодействующие!) связи окажутся разорванными, и чудовищные силы электростатического отталкивания разбросают осколки с бешеной скоростью.

На колпаке чинная надпись: «Элемент № 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000» и нечто относительно страхования жизни.

Конечно, такая картина даже в фантастическом мире без слабых взаимодействий является фантастической.

Нужно принять во внимание множество «забытых» нами обстоятельств. Все же, если бы не было слабых взаимодействий, если бы нейтрон был стабильной частицей, таблица элементов продолжалась бы на сотни, если не тысячи номеров.

Но еще более поразительные изменения произошли бы с таблицей изотопов.

В главе о ядерных силах говорилось, что изотопы при одинаковом числе протонов различаются количеством нейтронов в ядре. Изотоп может быть устойчивым лишь в том случае, когда соотношение между числом протонов и нейтронов остается в пределах стабильной нормы. Как только нейтронов становится больше, чем разрешается по этой норме, начинается β-распад. Если бы не слабые взаимодействия, то β-распада нечего было бы опасаться и возможности пополнения нейтронов в ядре колоссально увеличились бы. У водорода тогда стало бы не четыре изотопа (из которых только обычный водород и дейтерий стабильны), а практически бесконечное множество.

Правда, где-то в районе тысячного изотопа появилась бы новая причина неустойчивости, связанная с тем, что атомный электрон начал бы задевать гигантское ядро, вокруг которого он вращается. Начала бы сказываться, кроме того, тепловая неустойчивость, о которой уже говорилось, и т. д.

Но это уже, так сказать, привходящие по отношению к внутриядерной ситуации обстоятельства.

В том удивительном мире, куда привела нас фантазия, могло бы существовать и быть устойчивым еще одно экзотическое ядро. Ему пришлось бы отвести нулевую (перед водородом) клетку в менделеевской таблице. Это ядро — вообще без протонов. Действительно, если бы нейтроны не распадались, то один, два, сотня, миллиард нейтронов могли бы существовать как стабильные системы. Их можно было бы рассматривать как ядра — изотопы того фантастического элемента, у которого, собственно, нет атомов в обычном смысле этого слова. Ведь электроны нейтронами не притягиваются. Атомы без электронов, без химических свойств — согласитесь, это действительно нечто диковинное!

Однако почему мы говорим только о нейтронах? Ведь, как мы имели случай убедиться, слово «неустойчивая» приходится писать почти в каждой клеточке таблицы элементарных частиц. Неустойчивость же, как неоднократно подчеркивалось, за немногими исключениями связана с тем, что́ мы, пока несколько условно, называем слабыми взаимодействиями. Не будь последних, не только нейтроны, но и μ-мезоны, заряженные π-мезоны, K-мезоны, а также частицы тяжелее протонов и нейтронов — такие частицы объединяются общим названием «гиперонов» — стали бы стабильными. Вот, к примеру, μ-мезоны. Во многих отношениях они очень похожи на электроны и позитроны. Среди них есть заряженные как отрицательно, так и положительно. Но этим сходство не исчерпывается. Оно настолько велико, что физикам нередко начинает казаться, что, например, отрицательный μ-мезон — это, в сущности, тот же электрон, но только «прибавивший в весе» за счет каких-то пока неизвестных причин. Весит μ-мезон действительно в 207 раз больше, чем электрон.

А как же распад,— спросите вы,— разве это не существенное отличие? Электрон устойчив, а μ-мезон живет миллионные доли секунды. На это можно ответить таким примером. Представьте себе атом в возбужденном состоянии. Такой возбужденный атом тоже неустойчив: как правило, он почти мгновенно распадается на невозбужденный атом и фотон. И вместе с тем мы не говорим, что возбужденный и невозбужденный атомы — это разные системы, а предпочитаем употреблять выражение: одна и та же система в разных состояниях. Может быть, и μ-мезон — это возбужденный электрон?

Однако этот увлекательный сам по себе вопрос увел нас несколько в сторону от темы. Мы хорошо знаем, какую «полезную нагрузку» имеют электроны. Они формируют оболочку атомов, а стало быть, в частности, определяют химические свойства. Движение электронов обусловливает токи в металлах; электрон — главное действующее лицо во всевозможных электронно-лучевых приборах, начиная с простейшего диода (двухэлектродной лампы, применяемой в выпрямителях электрического тока) и кончая электронными микроскопами и бетатронами. Можно сказать, что электронам принадлежит ведущая роль в современной науке и технике. А не могли бы μ-мезоны играть такую же роль? Мешает нестабильность... А если бы не она — все электронные функции не без успеха, а порой и с известным преимуществом могли бы принять на себя μ-мезоны.

Не все сказанное относится к области фантастики (если бы не было слабых взаимодействий...). Атомы, например, у которых электроны заменены μ-мезонами (отрицательными, конечно), действительно обнаружены. Как ни мало живут такие «мезоатомы», исследователям все же удалось заснять весь их спектр. А это очень интересно: ведь орбита мезонов в 207 раз (во столько раз они тяжелее электронов) ближе к ядру, чем электронная. Поэтому мезон гораздо сильнее чувствует все особенности структуры ядра и информирует нас о них посредством своего спектра.

Если мы уже заговорили о системах, в состав которых входят μ-мезоны, то стоит упомянуть еще об одной любопытной возможности. Представьте себе

нечто вроде атома водорода, но только пусть роль ядра играет положительный μ-мезон. Будь μ-мезон устойчивым, из таких атомов можно было бы составлять молекулы. Можно было бы получать необыкновенные химические соединения вроде «сверхлегкой воды» и т. д.

Тема «мир без слабых взаимодействий» дает такой простор для воображения, что мы могли бы еще долго заниматься обсуждением разных диковинных вещей.

Однако мы и так потратили на фантастику много времени. Единственное, о чем стоит, пожалуй, еще упомянуть,— это гипероны.

Будь гипероны устойчивыми, необычайно обогатился бы набор атомных ядер. Оказались бы возможными стабильные ядра из смеси нейтронов, протонов и различных гиперонов, ядра из одних гиперонов. Из нейтральных гиперонов можно было бы строить электронейтральные куски гипер-ядерного вещества. Это даже и выговорить не так-то просто.

Однако мы уже достаточно пофантазировали. Читатель, познакомившийся с началом этой главы, вероятно, смог хотя бы в небольшой степени представить себе, насколько существенны для облика нашего мира слабые взаимодействия. Сколько всевозможных «запрещений» (и упрощений,— вероятно подумали некоторые) влекут они за собой. Название «слабые», таким образом, вовсе не означает незначительности проявлений этих взаимодействий.

И вместе с тем для этого названия есть веские причины. Чтобы понять их, нам придется поближе познакомиться с некоторыми важными явлениями.

Четверть века призрачного существования

Около сорока лет назад на страницах научных журналов появилось слово «нейтрино». В буквальном переводе на русский оно означает что-то вроде — «нейтральненькая». Так назвали новую частицу, которой суждено было стать самой, пожалуй, замечательной и популярной в семействе элементарных частиц.

Необычайным путем вошла она в науку; удивительными оказались ее свойства, и, наконец, необычайна ее роль в природе.

Эту частицу пришлось «изобрести», чтобы не рухнул весь фундамент, на котором покоится физика, чтобы спасти законы сохранения. Прямое экспериментальное доказательство ее существования появилось лишь в 1956 году. Четверть века нейтрино вело призрачное существование на страницах научных книг и статей. Хотя никто тогда не «видел» этой частицы, ей отводилось важное место во взаимных превращениях многих частиц. И прежде всего (хотя бы в смысле хронологическом) нейтрона.

Мы уже много говорили о β-распаде нейтрона. Образующиеся при этом распаде протон и электрон без особого труда обнаруживаются приборами. Но вот что странно: если измерить энергию нейтрона до распада и сравнить ее с той энергией, которую получают протон и электрон, образовавшиеся из этого нейтрона, то обнаруживается неувязка. Часть энергии, казалось, куда-то исчезает! Точно так же обнаруживается парадоксальное несохранение импульса и момента количества движения.

Законы сохранения — это самые фундаментальные принципы, которые удалось установить физикам на основе бесчисленных опытов и их истолкования. Конкретные методы описания движения могут меняться. Так на смену ньютоновскому описанию пришло квантовомеханическое, но законы сохранения всегда оставались незыблемыми. Более того, они сами были тем маяком, который помогал ученым двигаться в области неизведанного.

И вот явление β-распада, по видимости, прямо показало их несостоятельность. В физике возникло то, что можно назвать «чрезвычайным положением».

В то время мнения ученых разделились. Часть из них пыталась примириться с мыслью о нарушении законов сохранения. Они ссылались на то, что эти законы установлены для мира «больших вещей», для макромира, а не для элементарных частиц, и могут выполняться лишь «в среднем». Такой подход, помимо того, что он не снимал всех проблем, не мог импонировать большинству физиков еще и потому, что в нем не было положительной программы дальнейшего движения.

Гораздо привлекательнее выглядела гипотеза швейцарского теоретика Вольфганга Паули. Что, если вместе с протоном и электроном при распаде нейтрона рождается еще одна частица,— спросил себя Паули,— которая уносит с собой недостающую энергию, импульс, момент количества движения? Мы не наблюдаем этой частицы, но это легко объяснить. Стоит только представить себе, что она не имеет электрического заряда и ее масса покоя очень мала или вообще равна нулю. Тогда она не сможет отрывать электроны у атомов, расщеплять ядра и вообще производить все те «разрушения», по которым мы всегда судим о присутствии частиц.

Конечно, нельзя утверждать, что такая частица абсолютно ни с чем не взаимодействует. То, что было рождено, может затем и поглотиться. Иначе изобретение нейтрино означало бы все тот же отказ от законов сохранения, только в более хитрой, завуалированной форме. Энергия ведь терялась бы с нейтрино бесследно и навсегда.

Паули предположил, что нейтрино просто очень слабо взаимодействует с веществом и поэтому может пройти сквозь большую его толщу, не обнаружив себя. Сейчас мы знаем, насколько прав был Паули, высказывая такое предположение. Нейтрино — действительно самая «неуловимая» частица. Она свободно проходит через земной шар, способна пронизать Солнце. И только если представить себе чудовищный железный ком размером с нашу галактику, то в нем нейтрино поглотилось бы почти наверняка.

«Крестным отцом» нейтрино, давшим ему это имя, был известный итальянский физик Ферми. Именно он «узаконил» его, введя нейтрино в рамки существующей квантовой теории.

Работы Ферми и длинный ряд работ его последователей, казалось, полностью прояснили ситуацию. Масса покоя нейтрино оказалась равной нулю, как и у частицы света — фотона. Это имеет простой смысл: покоящихся нейтрино нет. Сразу же после рождения они движутся со скоростью света.

Хорошо известен также спин нейтрино. Он оказался таким же, как у протона или электрона. Сведений о нейтрино накапливалось все больше.



Теоретики предсказали, что у него должен существовать двойник, как есть «двойник» позитрон у электрона. Название двойнику пришло само собой — антинейтрино. Некоторая курьезность имеется в том, что те частицы, которые образуются при β-распаде нейтрона, по ряду соображений следует называть не нейтрино, а антинейтрино.

Экспериментаторы накопили много сведений о превращении частиц, в которых участвуют нейтрино и антинейтрино. Список таких превращений (о них мы поговорим еще в дальнейшем) сейчас уже довольно обширен. Оказывается, отнюдь не один β-распад нейтрона протекает с участием этих частиц-невидимок. Но как «поймать» их? Экспериментаторам удалось добиться и этого. Сделано это было с помощью простейшего по своей идее опыта. Возле ядерного реактора, в котором происходит громадное число β-распадов (и, следовательно, образуется очень много антинейтрино), был расположен массивный «ящик». Стенки его были из такого материала (свинец и парафин) и такой толщины, что сквозь них внутрь «ящика» заведомо не могла проникнуть ни одна частица. Ни одна — кроме антинейтрино. Ведь для

антинейтрино практически нет преград. Потоки антинейтрино из котла устремляются во все стороны, в частности в «ящик». Эти потоки так велики, что хотя каждая частичка антинейтрино имеет ничтожно малую вероятность поглотиться в веществе, заполняющем «ящик», из-за громадности числа этих частиц несколько актов поглощения может произойти за сравнительно недолгое время. По расчетам ученых процесс должен был протекать так. Пусть антинейтрино ($\bar{\nu}$) сталкивается с одним из протонов в точке *A* («ящик» заполнялся водой), заставляя его превращаться в нейтрон с одновременным образованием позитрона. Позитрон немедленно аннигилирует с «первым попавшимся» электроном (в точке *B*), давая два γ-кванта. Эти последние проходят через слой жидкого сцинтиллятора (вещества, начинающего светиться при прохождении сквозь него γ-квантов), расположенного возле внутренних стенок «ящика». Это свечение сразу же отмечают 150 фотоумножителей — приборов, реагирующих на слабейшие световые импульсы. А образовавшийся нейтрон? После непродолжительного блуждания в воде он должен был захватиться специально введенным в «ящик» кадмием (точка *C*), что также сопровождается образованием γ-квантов. Как видите, масса событий должна сопровождать захват антинейтрино. Так предсказывала теория. Но что скажут приборы? Зарегистрируют ли они все то, что было предсказано?

И приборы действительно зарегистрировали наконец то, что, несмотря на большую уверенность физиков, все же оставалось гипотетичным. Частица-невидимка выдала себя, попав в «капкан», поставленный учеными.

Казалось, физикам удалось «расправиться», с нейтрино и антинейтрино: теоретики уверенно их описывали, экспериментаторы научились их

с полной достоверностью обнаруживать. Однако вскоре природа преподнесла исследователям очередной сюрприз, как бы напоминая, что успокаиваться, когда имеешь дело с нейтрино, нельзя.

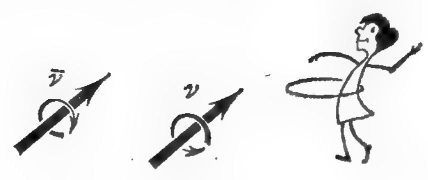
Нейтрино-спаситель и нейтрино-разрушитель

Нейтрино своим «рождением» спасло важнейшие законы сохранения. Однако то же нейтрино разрушило другой закон весьма общего значения. До 1956 года никому не приходило в голову усомниться в зеркальной симметрии природы. Это значит, что любой процесс, происходящий в природе, как считалось, может протекать и так, каким он виден в зеркале. Соответственно, зеркальное изображение любого объекта — также возможный объект природы. Правда, человек, рассматривающий свое отражение в зеркале, мог бы, вдумавшись, уловить и некоторые любопытные детали: правое превращается в левое. «Зеркальный двойник» пишет левой рукой — но ведь есть левши; он застегивает костюм на левую сторону — но ведь только привычка заставляет мужчин поступать иначе; у «двойника» сердце расположено справа — но ведь есть же, в конце концов, хотя и очень редкие случаи, когда такое расположение встречается у людей. Короче говоря, и здесь мы, как будто, убеждаемся, что в «зазеркалии» никаких чудес вроде тех, которые видела Алиса, нет: там все выглядит так, как могло бы выглядеть и в «предзеркалии».

Существует зеркальная симметрия, симметрия правого и левого. Существует ли она, однако, всегда?

Долгое время ничто не заставляло усомниться в этом, а привычное часто кажется непреложным. Изучение нейтрино еще раз напомнило физикам: в науке нет само собой разумеющихся истин.

Мы уже говорили, что нейтрино имеет спин — собственный момент количества движения. Говоря на наглядном «классическом» языке, оно как бы закручено (еще раз напомним приводившийся ранее пример пули, вылетевшей






из нарезного ствола). Те нейтрино, которые образуются при распаде антинейтрона, оказываются закрученными строго определенным образом: направление их «вращения» образует левый винт с направлением движения. Никаких исключений (вроде рождения людей с сердцем в правой половине груди) здесь нет. Но ведь это явное нарушение зеркальной симметрии: винт с левой нарезкой будет казаться в зеркале имеющим правую резьбу. «Правовинтового» же нейтрино не существует. Нейтрино — это единственный объект, не имеющий, так сказать, зеркального изображения.

Значит ли это, что, поставив нейтрино перед зеркалом (и допустив на мгновение, что мы каким-то чудом можем его видеть), мы вообще не увидим никакого отражения? Нет, мы этого не утверждаем. Речь идет о том, что это отражение обладает такими «свойствами» (если так можно вообще говорить об отражении), какими нейтрино никогда ни при каких условиях обладать не может. Но удивительным образом эти свойства такие же, как у антинейтрино.

Итак, отражением частицы нейтрино в зеркале является другая частица — антинейтрино. Если вдуматься, это выглядит не менее поразительно, чем, скажем, то, как если бы отражением очаровательной девушки в зеркале оказался бы немолодой лысый мужчина.

Мы, разумеется, не имеем в виду сравнение степени привлекательности нейтрино и антинейтрино, мы хотим лишь подчеркнуть, что это разные частицы. Разные и в то же время зеркально-симметричные. Установление этого факта означало крушение уверенности в том, что можно назвать «простой симметрией правого и левого». Это было немалым сюрпризом для физиков.

В зеркале вы видите свое анти-Я

В нашем мире бросается в глаза подавляющее преобладание частиц над античастицами. А ведь согласно фундаментальным законам природы античастицы и частицы имеют совершенно равные права на существование. Антипротоны и антинейтроны могут образовывать антиядра. Вместе с позитронами антиядра могут составлять антиатомы и куски антивещества.

Мы ничего не знаем о том, каким образом вещество Вселенной оказалось отсепарированным от антивещества. Мы можем пока только констатировать факт такой сепарации. До 1957 г. физики были убеждены, что при замене всех частиц античастицами мы получили бы мир, в котором все происходило бы точно так же, как и в нашем. Считали, что природе свойственна симметрия и такого рода.

Однако вспомним свойства нейтрино. Из-за закрученности этой частицы процессы в мире, в котором нейтрино заменены антинейтрино, будут происходить уже по-иному. Они будут происходить так, как при зеркальном отражении, которое как раз и меняет закрученность нейтрино. Следовательно, в частности, естественно предположить, что распад антикобальта будет происходить точно так же, как и распад кобальта, видимый в зеркале.

Объединяя две асимметрии, зеркальную и зарядовую вместе, мы приходим к более важной симметрии, получившей название принципа комбинированной четности или симметрии. Согласно этому принципу зеркальное изображение любого процесса в природе также является возможным процессом, если только все частицы заменить античастицами.

Если раньше думали, что отражение тела в зеркале отличается от самого тела только заменой левого

на правое, то согласно новым представлениям изображение ведет себя так, как если бы оно состояло из антивещества: зеркальные изображения нейтрино — антинейтрино, электрона — позитрон и т. д. В зеркале вы видите свое анти-Я: левое заменено на правое, а частицы на античастицы.

Опыты Ву

Необычные свойства нейтрино приводят к существованию в нашем мире процессов, идущих с нарушением зеркальной симметрии. Впервые это было экспериментально установлено в опытах американского физика Ву, поставленных по идее Ли и Янга — теоретиков, указавших на возможность нарушения зеркальной симметрии. Схема этих опытов, если не вдаваться в подробности, такова.

Радиоактивный кобальт (Co^{60}) охлаждается до очень низких температур и помещается в сильное магнитное поле. При этом все, или, во всяком случае, заметная доля, ядер оказываются ориентированными: их магнитный момент и пропорциональный ему момент количества движения параллелен магнитному полю. Измеряется количество возникающих при β-распаде электронов, летящих как по, так и против направления магнитного поля.

Если бы зеркальная симметрия существовала, то это количество должно было бы быть одинаковым — в этом легко убедиться, представив себе «зеркальную» установку. Эксперимент убедительно показал существование явной асимметрии (60 % и 40 %, а не по 50 %).

Повторенные затем во многих лабораториях мира, эти опыты не оставили сомнений в том, что зеркальная симметрия нарушается.

Нарушение этой симметрии, как показывает теория, возможно именно благодаря тому, что вылетающие из ядра одновременно с электронами антинейтрино всегда закручены строго определенным образом: направление их вращения, т. е. спин, составляет правый винт с направлением движения.

Впоследствии удалось обнаружить нарушение зеркальной симметрии при распаде π- и μ-мезонов. Здесь также появляются нейтрино или антинейтрино. Более того, мы сейчас знаем, что зеркальная симметрия нарушается во всех процессах, обусловлен-

ных слабыми взаимодействиями. Это относится, например, к рождению и распаду Λ^0-частиц, хотя нейтрино в таких процессах не участвует. Но сюрпризы этим далеко не исчерпываются.

Несохранение комбинированной симметрии

Величины, характеризующие в квантовой механике состояние частицы (они называются волновыми функциями), ведут себя по-разному при операции замены частиц на античастицы с одновременным зеркальным отражением. В одних случаях волновая функция не меняется вовсе — четность положительна, а в другом она меняет знак — четность отрицательна. При всех превращениях элементарных частиц эта комбинированная четность системы должна сохраняться.

Из сохранения комбинированной четности вытекает ряд следствий, которые можно проверить на опыте. Так, в частности, существуют две нейтральные частицы: K_L^0- и K_S^0-мезоны, отличающиеся друг от друга только комбинированной четностью. У K_S^0-частицы она положительна, а у K_L^0-частицы — отрицательна. Из-за этого частицы должны вести себя поразному при распадах. K_S^0-мезоны могут распадаться на два π-мезона, ибо система из двух π-мезонов имеет положительную четность, а K_L^0-мезоны только на три, ибо четность системы из трех π-мезонов отрицательна. Различие в каналах распада приводит к различию во временах жизни. K_L^0-мезоны живут почти в сто раз дольше, чем K_S^0-мезоны.

Летом 1964 г. стало известно о новых исследованиях, которые снова (уже в какой раз) потрясли фундамент теории элементарных частиц. При исследовании распада нейтральных K-мезонов было обнаружено, что на расстоянии в 19 *м* от мишени, в которой происходило рождение пучка K^0-мезонов, наблюдался их распад не только на три π-мезона, но и на два! Наблюдалось это с малой вероятностью около 0,2 %, но все же совершенно бесспорно.

На таком большом расстоянии от мишени K_S^0-мезонов не могло быть; они должны были распасться, не долетев до приборов, регистрирующих распад. На два π-мезона, следовательно, распадались K_L^0-мезоны. А это означает нарушение комбинированной симмет-

рии при слабых взаимодействиях, ответственных за распад нейтральных K-мезонов. Недавно установленный закон сохранения нарушается в данных опытах.

В чем здесь дело, пока не ясно. Высказывается предположение, что здесь проявляется действие каких-то особых сверхслабых сил. Но природа этих сил совершенно неизвестна. Никаких других проявлений этих сил, кроме как при распадах K^0-мезонов, не обнаружено.

Два сорта нейтрино

В 1962 г. в нейтринной физике произошло еще одно удивительное событие. Мы уже говорили о μ-мезонах. Их сходство с электронами (и позитронами, если речь идет о μ^+, т. е. о положительных мезонах) касается и взаимодействий с нейтрино.

В опытах 1956 г. антинейтрино, сталкиваясь с протонами, порождало позитроны. А почему не μ^+-мезоны? Просто потому, отвечали физики, что не хватало энергии. μ^+-мезоны примерно в 200 раз тяжелее позитронов и, следовательно, для их образования требуется во столько же раз бóльшая энергия. Антинейтрино же, вылетающие из реактора, такого запаса энергии не имеют. А если бы имели? Тогда,— отвечали ученые,— μ^+-мезоны рождались бы примерно столь же часто, как и позитроны.

Если бы, далее, какой-нибудь дотошный человек продолжал бы спрашивать: а вдруг оказалось бы, что и быстрые антинейтрино из реактора рождают позитроны? — то многие физики, по-видимому, отвечали бы на такой вопрос скептической улыбкой. Ведь окажись это так, пришлось бы признать, что между «электронным» и «μ-мезонным» нейтрино есть какая-то разница. Пришлось бы признать, что есть разные сорта нейтрино, а это как-то не укладывалось в уже устоявшееся представление о нейтрино. Даже в такой «молодой» отрасли науки, как нейтринная физика, успевают образоваться привычные представления.

Вопрос о двух нейтрино оказался актуальным лишь в тот момент, когда появилась реальная возможность решить его экспериментально. Идея опыта была предложена советским физиком Б. М. Понте-

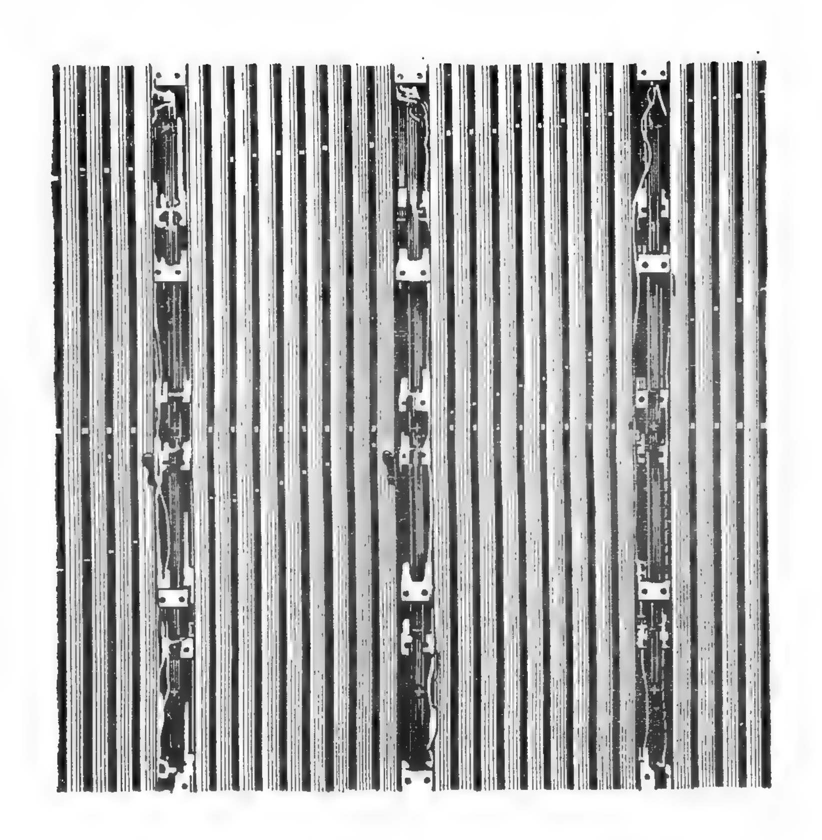
корво. Сам опыт с блеском провели наши американские коллеги.

Нейтроны — очень удобный источник антинейтрино. Однако, чтобы антинейтрино рождались с большими энергиями, нужно предварительно сообщить значительную энергию и нейтронам. Но ускорителей для нейтронов нет. Эти частицы нейтральны, а разгонять мы сегодня умеем только заряженные частицы.

Есть, однако, и другой путь. Хорошо известно, что при распаде π-мезона образуется μ-мезон и нейтрино (или антинейтрино). Какое нейтрино — «электронное» или «μ-мезонное»? Недавно такой вопрос даже не ставился. Теперь, когда он поставлен, мы можем осторожно ответить: во всяком случае, «μ-мезонное» наверняка. Оно тесно связано с μ-мезоном уже «общностью рождения». Является ли оно одновременно «электронным»? Нужен опыт...

Опыт, проведенный в 1962 г. на ускорителе в 30 миллиардов электронвольт в Брукхейвене, подготовлявшийся два года, выглядел так. Пучок ускоренных протонов налетал на бериллиевую мишень, рождая потоки π-мезонов. Эти последние в свою очередь, распадаясь, давали наряду с μ-мезонами то, что было самым важным: антинейтрино (и нейтрино) больших энергий. Правда, их было совсем не так много, как в опытах с реактором. Однако вычисления показали, что быстрые антинейтрино куда «охотнее» взаимодействуют с другими частицами, чем медленные *). Для регистрации порождаемых антинейтрино частиц применялась так называемая искровая камера. Эта камера содержала 10 тонн алюминиевых пластин, между которыми создавалось высокое напряжение. Если быстрая заряженная частица пролетает сквозь пластины, то в зазорах на пути ее следования возникает искровой разряд между пластинами. Огненный след, хорошо видимый на фотографии, позволяет легко отличить μ-мезоны от позитронов и электронов. Чтобы в камеру проходили

*) Слова «быстрые» и «медленные» обозначают лишь различие энергий. Скорости же всегда одинаковы: совпадающие со световой.



извне только нейтрино (и антинейтрино), имелась специально предусмотренная защита.

Наблюдения велись шесть месяцев. За это время было обнаружено всего пятьдесят случаев (вспомните — взаимодействия слабые!) рождения частиц. И все они без исключения были μ-мезонами! Ни одного электрона или позитрона! Это было новым поразительным сюрпризом. Существование двух разных типов нейтрино (и антинейтрино) — «электронного» и «μ-мезонного» — было доказано.

Что это за типы? Каково различие между ними? Каковы детали законов, ими управляющих? Мы пока не знаем. Перед учеными встала новая загадка, которую еще предстоит разрешить.

У читателя может сложиться впечатление, что нейтрино — строптивая и неблагодарная частица. Правда, один раз она выручила физиков, когда спасла закон сохранения энергии, зато уж в дальнейшем отыгралась вволю, на каждом шагу устраивая разные каверзы и подставляя ножку ученым. Четыре десятка лет изучают нейтрино — и как будто опять приходится начинать все сначала.

Это, конечно, не совсем так. Как ни увертлива эта частица, ей не удалось полностью спрятаться. Мы сейчас знаем о ней совсем немало и о многом догадываемся.

Нам, например, немало известно о взаимоотношениях нейтрино с другими частицами,— о том, в каких распадах нейтрино участвует, и о том, какие превращения нейтрино вызывает.

Нейтринная алхимия

Приведем для примера некоторые распады, где нейтрино появляется в первом поколении (ведь продукты распада сами могут быть неустойчивыми и, распадаясь, порождать нейтрино).

$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$ — распад отрицательного μ-мезона на электрон, нейтрино и антинейтрино *).

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ — распад положительного π-мезона на положительный μ-мезон и нейтрино.

$$K^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu$$

или

$$K^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu + \pi^0 \quad \text{и} \quad K^+ \longrightarrow e^+ + \nu + \pi^0.$$

Эти три «канала распада» положительного K-мезона возможны потому, что K-мезон — сравнительно тяжелая частица. Запас массы здесь достаточен, чтобы породить целых три «осколка». В тех случаях, когда нейтральный π-мезон не образуется, излишек энергии делится между μ-мезоном (или позитроном) и нейтрино.

Наконец, напомним еще уже хорошо известный нам пример β-распада нейтрона на протон, электрон и антинейтрино.

*) Мы будем обозначать частицы буквами. Смысл этих обозначений легко понять, взглянув на таблицу элементарных частиц (стр. 276—277).

У этих, равно как и у любых других реакций между элементарными частицами, есть замечательные особенности. Прежде всего, символы, обозначающие частицы, можно «переносить на другую сторону стрелки», заменяя при этом, однако, частицы на античастицы.

Кроме того, можно изменять направление стрелки. Это означает, что каждая реакция может протекать как в «прямом», так и в «обратном» направлении.

Проделаем это, к примеру, с реакцией β-распада нейтрона. Сначала мы записали ее в виде

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}.$$

Теперь перенесем электрон влево и поменяем направление стрелки. Получится реакция, протекающая по схеме:

$$n + e^+ \longleftarrow p + \bar{\nu}.$$

Но ведь это наша старая знакомая — та самая реакция, которая впервые позволила обнаружить антинейтрино! Действительно, словами она прочитывается так: система из антинейтрино и протона после их столкновения превращается в систему из нейтрона и позитрона.

Аналогичное «жонглирование символами» приводит к удивительно удачному способу предсказания целой цепи реакций с частицами.

Вернемся еще раз к «проблеме двух нейтрино». Рассмотрим реакцию распада π-мезона, например положительного:

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu.$$

Строго говоря, писать просто значок «ν» для обозначения нейтрино уже нельзя. Поскольку эта частица появляется «в компании» с μ-мезоном, ее естественно назвать «μ-мезонным нейтрино» и обозначить, например, как ν_μ. Теперь вспомним о нашем правиле. Оно сразу же позволит написать интересную реакцию:

$$\nu_\mu + \pi^- \longrightarrow \mu^-.$$

Значит, при столкновении с отрицательными π-мезонами (а они всегда найдутся в достаточном количестве в мезонном «облаке», окружающем любой из

протонов и нейтронов, входящих в состав атомных ядер) «μ-мезонное нейтрино» должно рождать именно μ-мезоны, а не электроны.

Эти соображения и легли в основу теоретических разработок опытов по обнаружению «двух нейтрино».

Однако подобное «жонглирование символами» имеет жесткие ограничения, смысла которых пока не понимает никто.

Взгляните на таблицу элементарных частиц на стр. 276—277. Там есть группа легких частиц — лептонов. В нее как раз входят оба нейтрино (электронное и мюонное), электрон и μ^--мезон вместе с четырьмя соответствующими античастицами.

Оказывается, что при любых реакциях между частицами при всех рождениях и уничтожениях частиц совершенно неукоснительно выполняется закон: *разность числа лептонов и антилептонов до реакции равна разности этих чисел после реакции.*

Посмотрите, например, реакцию распада нейтрона. До реакции лептонов не было. После реакции появляется один лептон — электрон и один антилептон — антинейтрино. Разность числа лептонов и антилептонов после реакции равна нулю. И так происходит всегда. Существует закон сохранения числа лептонов, аналогичный закону сохранения тяжелых частиц — барионов и закону сохранения электрически заряженных частиц.

Почему разность между числом лептонов и антилептонов во Вселенной остается неизменной? Здесь нам пока ничего не остается делать, как развести руками. Так есть, и набранная к настоящему времени статистика реакций с участием лептонов столь велика, что мы уверенно можем сказать, что так и будет *).

Очень важно, что закон сохранения лептонов позволяет заранее совершенно уверенно предсказать, какие реакции между частицами не могут идти.

Было бы утомительно, да и не очень полезно, скрупулезно выписывать все реакции с участием

*) Собственно говоря, примерно так же обстоит дело с сохранением электрического заряда и числа тяжелых частиц. Почему эти законы выполняются, отнюдь не более ясно, чем выполнение закона сохранения лептонов.

нейтрино. Мы и не собираемся этого делать. Важно выяснить другое: что, собственно, мы имели в виду, когда говорили о «слабости взаимодействия»?

2.

Подумаем еще раз: что такое заряд?

Мы уже говорили о том изменении, которое претерпело понятие «заряд». Вернемся же к этому еще раз, чтобы резюмировать все, что мы узнали. Подчеркнем: все, о чем мы сейчас будем говорить, представляет собой самую суть понятия «заряд», как мы его сейчас понимаем.

Электрический заряд — «старейший» в своей семье (если не говорить о гравитационном заряде, занимающем несколько особое место). «Детство» его связано с классической, неквантовой теорией. Больше того, просто с механикой. Механика же, как вы помните, строится на базе описания с помощью введения сил. Неудивительно, что и электрический заряд долгое время понимался как мера силового воздействия одной заряженной материальной точки на другую.

Максвелловское понимание электромагнетизма мало что здесь изменило. Акцент был сделан на посреднике электрических и магнитных взаимодействий, на поле. Самый же заряд по-прежнему остался мерой силы — силы, с которой действует поле на тела. Правда, этим его функции не исчерпывались. Тот же заряд характеризует, по Максвеллу, и меру способности тел создавать само поле.

Идеи квантового описания внесли новые подробности. Утратило значение «силовое» описание. Взаимодействие электрически заряженных тел предстало как результат обмена квантами электромагнитного поля — фотонами. Если бы мы не знали, что никаких «запасов фотонов» внутри электронов, скажем, нет, то можно было бы себе представить, что электромагнитные кванты способны «выливаться» из

частиц или «вливаться» в них, подобно жидкости через отверстие. Тогда заряд как бы определял ширину этих отверстий: чем они шире, тем больше поток квантов. Но никаких «запасов» такого рода, конечно, нет, и мы говорим просто, что электрический заряд определяет степень интенсивности испускания (или поглощения) фотонов заряженными частицами или их группами.

Здесь нельзя не отметить одного обстоятельства, которое раньше, в предыдущих главах, осталось в тени (может быть потому, что там рассмотрение велось с несколько иной точки зрения).

Это обстоятельство состоит в следующем. Испустив или поглотив фотон, любая частица — электрон, протон, заряженный π- или μ-мезон и т. д. — можно перебрать все имеющие электрический заряд частицы в таблице — не испытывает никаких превращений. Точнее говоря — почти никаких: ведь сами эти частицы теряют или приобретают при этом энергию. Но это касается только изменения состояния движения.

Итак, существует обширный круг процессов, в которых взаимодействие с фотонами меняет состояние движения частиц, но не вызывает их взаимных превращений *). Это замечательнейшее обстоятельство, в частности, и «позволяет» электромагнитным взаимодействиям во многих случаях проявляться в неквантовом обличии. Ядерные взаимодействия уже таким свойством не обладают или, может быть, содержат лишь какие-то его слабые отголоски.

При ядерных взаимодействиях также совершается обмен квантами — только не фотонами, а мезонами. Опять можно говорить о заряде — ядерном в данном случае, как о мере интенсивности испускания протонами и нейтронами квантов мезонных полей, переносящих взаимодействия.

Но здесь есть существенные различия. В некоторых отношениях настолько существенные, что это даже вызвало изменение терминологии.

*) Вот некоторые примеры процессов, в которых электромагнитные взаимодействия связаны с превращениями частиц: рождение и аннигиляция пар электрон — позитрон, распады нейтрального π^0-мезона и нейтрального Σ^0-гиперона.

Заряд — константа взаимодействия

Первое различие состоит вот в чем. При испускании заряженных мезонов происходит превращение частиц-источников. Это уже нечто совершенно новое по сравнению с электромагнитным взаимодействием.

Мы можем сказать, что процессы ядерного (или, иначе говоря, сильного) взаимодействия сопровождаются, вообще говоря, взаимным превращением частиц. Этого не происходит в единственном случае: когда испущенным или поглощенным является нейтральный мезон. Во всех остальных случаях ядерные взаимодействия связаны не только с изменением состояния движения, но и с изменением сорта частиц.

И в этом свете ядерный заряд выступает как количественное мерило того, как часто, с какой интенсивностью протекают эти взаимные превращения, эти трансмутации.

Здесь, однако, подчеркнутая нами сторона дела выступает еще не очень ярко. Уж очень много сходного между протоном и нейтроном. Если бы вдруг «выключились» электромагнитные взаимодействия, то их вообще невозможно было бы отличить друг от друга. Поэтому часто говорят, что это не разные частицы, а разные «зарядовые состояния» одной и той же частицы. Но сильные взаимодействия типичны не для одних нуклонов. Сильно взаимодействуют и гипероны (частицы тяжелее нейтрона и протона, обозначаемые как Λ-, Σ- и Ξ-частицы), а также K-мезоны. Здесь уже вполне ярко проявляется та черта сильных взаимодействий, что они связаны с превращением одних частиц в другие.

Наконец, слабые взаимодействия. Они редко ассоциируются у физиков с представлением о чем-то, хотя бы отдаленно напоминающем силовые воздействия. И «заряд» здесь называют, как правило, просто «константой слабых взаимодействий», как бы подчеркивая, что по своему смыслу он очень далек от классического аналога.

Точно так же, впрочем, вместо электрического заряда можно говорить о константе электромагнитных взаимодействий. В случае ядерных сил физики уже давно предпочитают говорить о константе сильных

взаимодействий, а не о ядерном или мезонном заряде.

Константа слабого взаимодействия по праву стоит в одном ряду с величинами, характеризующими в квантовой теории другие взаимодействия. Ведь в этой теории *любая константа взаимодействия* (начнем привыкать к этому термину, замещающему термин «заряд») *определяет, насколько быстро идут превращения одних частиц в другие.* Константа электромагнитных взаимодействий — превращения любых заряженных частиц в те же частицы (но с измененным состоянием движения) плюс фотон. Константа ядерных взаимодействий — взаимные превращения барионов с участием π-, K- и других мезонов. Наконец, «слабый заряд», константа слабых взаимодействий, подобно предыдущим величинам описывает интенсивность протекания превращений с участием нейтрино (и антинейтрино). Мы увидим дальше, что ее роль этим не исчерпывается, но не будем забегать вперед.

Законы сохранения барионного и лептонного зарядов

Теперь несколько слов о другом отличии электрического заряда от прочих, которое, в основном, и привело к тому, что сейчас силы характеризуют константами взаимодействий, а не зарядами. (Кстати, вы, вероятно, заметили, что замена короткого слова «заряд» двумя длинными — «константа взаимодействия» — вызывает, помимо всего прочего, чисто стилистические трудности при частом употреблении.)

Термин «заряд» не был изгнан из области сильных и слабых взаимодействий, а лишь перестал характеризовать их количественно, превратившись в сохраняющееся квантовое число. Произошло это вот почему. До сих пор мы не обращали внимания на то, что электрический заряд двулик. С одной стороны, он характеризует интенсивность электромагнитных взаимодействий, а с другой стороны, является сохраняющейся величиной. Как вы помните, алгебраическая сумма электрических зарядов в замкнутой системе остается неизменной.

Обе эти функции заряда не связаны органически. Нет такого закона природы, который требовал бы сохранения констант взаимодействия для любых сил.

Для электромагнитных сил это так, а вот для ядерных и слабых уже нет. В сильных и слабых взаимодействиях слитые воедино в электродинамике функции заряда расщепляются. Появляются две независимые величины. Одна из них характеризует интенсивность взаимодействий, а другая — сохранение числа частиц: барионов или лептонов. Логично было сохранить термин «заряд» во избежание путаницы за одной из этих величин. Так и было сделано. Термин «заряд» стал применяться к сохраняющимся квантовым числам, а не к характеристикам взаимодействий. Можно, конечно, было бы поступить и иначе.

Сначала вспомним, что сейчас называют барионным зарядом. Вы уже знаете, что число тяжелых частиц — барионов — сохраняется. Точнее, остается постоянной разность между числом барионов и антибарионов, подобно тому как остается неизменной разность между числом положительно и отрицательно заряженных частиц.

Этот эмпирический факт можно описать следующим образом. *Ввести новое квантовое число, которое для всех барионов принимает значение* $+1$, *а для всех антибарионов значение* -1, *и назвать это число барионным зарядом. Тогда сохранение числа барионов есть сохранение алгебраической суммы барионных зарядов.* Итак, у барионов появилась новая характеристика — барионный заряд, причем эта новая характеристика не имеет связи с константой сильных взаимодействий, которая не сохраняется.

Константа сильных взаимодействий, например, у протона и антипротона одна и та же не только по величине, но и по знаку. Поэтому при аннигиляции протон-антипротонной пары их константы взаимодействия просто исчезают. В то же время алгебраическая сумма электрических зарядов не меняется, так как протон и антипротон имеют разные знаки константы электромагнитных взаимодействий — электрического заряда.

Корреляция между барионным зарядом и константой сильных взаимодействий лишь в том, что все частицы, имеющие барионный заряд, сильно взаимодействуют. Электроны и другие лептоны его лишены.

Нет барионного заряда и у переносчиков ядерных взаимодействий — π- и K-мезонов, подобно тому как нет электрического заряда у фотонов.

В мире больших тел, в макромире, нет ни одного закона сохранения, хотя бы отдаленно напоминающего закон сохранения барионного заряда. Если бы подобный закон существовал, то это приводило бы к удивительнейшим ситуациям. Представим себе на минуту, что существовал бы закон сохранения человеческих индивидуумов. Тогда мужчины и женщины рождались бы только парами и в дальнейшем могли бы существовать неограниченно долго. Но при первой попытке образовать семью они тут же исчезали бы (по крайней мере для общества).

Именно таково положение вещей в мире тяжелых частиц. Аналогичным образом дело обстоит с лептонами, которые участвуют все без исключения в слабых взаимодействиях.

Разность между числом лептонов и антилептонов, как мы уже говорили, сохраняется, причем сохранение числа лептонов (будем так говорить для краткости) не имеет отношения к константе слабых взаимодействий.

Закон сохранения числа лептонов можно формулировать количественно простым образом, если всем лептонам приписать лептонный заряд $+1$, а всем антилептонам — заряд -1. *Тогда алгебраическая сумма лептонных зарядов должна оставаться неизменной.*

С открытием двух сортов нейтрино закон сохранения числа лептонов усложнился. Теперь для описания возможных превращений с лептонами нужно ввести два различных лептонных заряда. Электрону и электронному нейтрино следует приписать электронный лептонный заряд, а μ-мезону и мюонному нейтрино — μ-мезонный лептонный заряд (терминология здесь не вполне установилась и приходится пользоваться такими сложными названиями), причем оба эти заряда сохраняются независимо друг от друга. Алгебраическая сумма тех и других зарядов не меняется при любых реакциях между частицами.

Вероятно, электрический заряд оказался способным совмещать в себе функции константы взаимодей-

ствия и сохраняющегося квантового числа по той причине, что константа электромагнитных взаимодействий может иметь различные знаки: наряду с притяжением существует и отталкивание. В сильных и слабых взаимодействиях этого нет и потому такого рода совмещение функций здесь невозможно. Впрочем, во всем этом пока нет полной ясности.

Вывод, может быть, самый важный в книге

Теперь, после экскурса в область новых законов сохранения, подведем некоторый итог тому, что мы знаем о взаимодействиях. Любая константа взаимодействия определяет, насколько активно протекают превращения в определенных группах родственных процессов. (По существу слово «родственный» часто и обозначает только то, что в данном классе превращений можно обойтись одной и той же константой взаимодействия.)

Сегодня таких констант — если считать вместе с гравитационной — четыре типа. Всего четыре! И все бесконечное многообразие событий в окружающем нас мире сводится именно к ним!

По возможности точное измерение различных констант взаимодействия — одна из важнейших для физики задач. Это отнюдь не всегда просто. Времена не только Кулона, но и Милликена прошли.

Более наглядно сравнивать не константы, а энергии различных взаимодействий частиц (при определенных расстояниях между ними). Если условно принять энергию ядерного (мезонного) взаимодействия за единицу, то электромагнитные взаимодействия составят 10^{-2}, а слабые 10^{-14} этой величины.

Здесь уже трудно усомниться в правомерности названия «слабые» для взаимодействий последнего типа.

Но в то же время в этом, как и во многих других случаях, нельзя забывать, что «слабое» отнюдь не является синонимом «несущественного».

Силы в природе и законы сохранения

Если отвлечься от гипотетической трансмутации гравитонов, то можно утверждать, что три типа сил вызывают превращения элементарных частиц друг в друга. Фундаментальный вопрос, вопрос вопросов — *какие превращения*

частиц возможны? Ответ на него неожиданно прост. Сильные электромагнитные и слабые взаимодействия готовы вызвать любые превращения всего во все, и в мире существуют относительный порядок, относительная устойчивость лишь потому, что действуют мощные ограничители. Это законы сохранения! Все, что может произойти без нарушения законов сохранения, в действительности происходит под влиянием трех сил.

По выражению Кеннета Форда в микромире господствует полная демократия. Частицы могут вести себя как угодно в рамках закона. Если раньше думали, что фундаментальные законы определяют то, что может (и должно) произойти, то теперь приходится считать самыми главными те законы, которые утверждают, что не может произойти. Такими законами и являются законы сохранения. Они абсолютно запрещают процессы, в которых обязанные быть сохраняющимися величины не остаются постоянными.

В конце концов это изменение представлений о фундаментальных законах природы определяется просто вероятностным характером квантовых законов движения и превращений элементарных частиц.

Именно вероятностный характер законов не позволяет утверждать наверняка, что произойдет при столкновении двух частиц. Так, при столкновении быстрого протона с нейтроном могут появиться самые разнообразные частицы. Может быть рождено три π-мезона и пара K-мезонов. С тем же успехом π-мезонов может быть пять и т. д. В большой серии одинаковых опытов реализуются все возможности. Вероятности конечных результатов столкновения различны, но все они не равны нулю, если не противоречат законам сохранения. Поэтому всегда можно сказать, что не произойдет, но никогда нельзя заранее утверждать, что же получится в конце реакции.

На чем держится наш мир

Часто при первом знакомстве с миром элементарных частиц удивляются, почему большинство частиц нестабильно. В действительности же удивляться нужно не этому. Взаимопревращения — это образ жизни элементарных частиц.

Под действием трех типов сил никогда не прекращаются кратковременные превращения частиц друг в друга. Если нет препятствий со стороны закона сохранения энергии (другие законы сохранения выполняются и при таких процессах), то рано или поздно произойдет реальное превращение: тяжелая частица распадается на более легкие.

При этом ничто не запрещает обратного процесса. Встретившись вместе, дочерние частицы сольются, превращаясь в материнскую. Однако такая встреча очень мало вероятна. Частицы разлетаются от места рождения, и так как наш мир не очень густо населен частицами, встреча их с братьями и сестрами, как правило, не успевает произойти. Они раньше распадутся, если только не являются стабильными. Все процессы микромира, в частности превращения частиц, обратимы, но обратный распаду процесс в обычных условиях мало вероятен. Лишь при сверхплотных состояниях вещества, в недрах тяжелых звезд, обратные процессы, по-видимому, происходят столь же часто, как и прямые.

Поэтому надо ожидать, что рожденная частица долго не может существовать. Так и есть на самом деле, за некоторыми исключениями. Таких исключений пять, если не считать античастицы: фотон, два сорта нейтрино, электрон и протон. Удивляться следует именно тому, что стабильные частицы все же существуют.

То, что фотон и нейтрино стабильны, понять не сложно. Они легче легкого. Их масса покоя уже равна нулю, и на более легкие частицы они распадаться не могут. Все другие частицы, казалось бы, должны распадаться на фотоны и нейтрино. Закону сохранения энергии это не противоречит.

Однако две частицы — электрон и протон — избегают саморазрушения. Почему? Только из-за особых законов сохранения.

Мы не знаем как следует, почему электрический заряд в природе сохраняется. Но зная, что он сохраняется, мы можем понять причину стабильности электронов. *Электрон — самая легкая из заряженных частиц и по этой причине не может распадаться.* Более легкие частицы фотон и нейтрино не заряжены.

Распад электрона поэтому неминуемо приводил бы к нарушению закона сохранения заряда. Обеспечение стабильности электрона — самая, пожалуй, большая заслуга этого закона сохранения. Протон не распадается, несмотря на очень большой избыток энергии покоя по сравнению с легкими частицами и разнообразные возможности распада на мезоны и лептоны, только потому, что он является *самым легким из барионов*. Стабильность ядер, а значит и всей Вселенной, держится на законе сохранения числа барионов. Этот закон является мощным тормозом для распада протона на другие частицы.

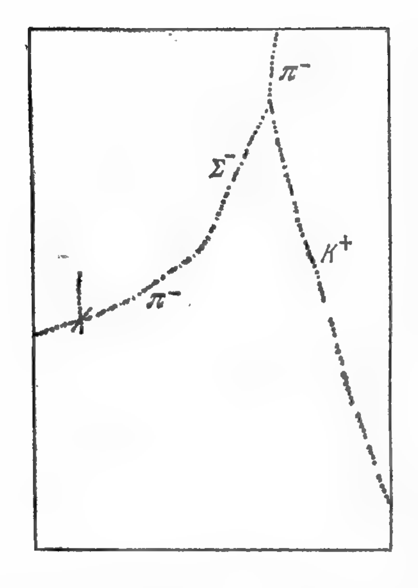
Страшно подумать, что было бы без законов сохранения электрического и барионного зарядов. Мир представлял бы собой безрадостное скопище фотонов и нейтрино, которые лишь изредка производили бы на свет эфемерные образования, тут же возвращающиеся в фотонно-нейтринную нирвану. За время 10^{-10} секунды даже могучая природа не смогла бы создать таких разумных существ, как мы с вами.

Сохраняются не только электрический, барионный и лептонный заряды. Есть и другие квантовые числа, которые также сохраняются, но уже не всегда. С ними вам предстоит познакомиться в дальнейшем.

В физику входит странность

В прекрасном популярном обзоре состояния физики элементарных частиц, опубликованном Гелл-Манном и Розенбаумом в 1957 г.*), эпиграфом взяты слова Френсиса Бэкона: «Не существует совершенной красоты, которая не содержала бы в себе некоторую долю странности». Близко соприкоснувшись с идеями современной физики, нельзя, кроме всего прочего, не почувствовать их эстетического совершенства. (Одному из виднейших современных теоретиков, Дираку, принадлежат отнюдь не лишенные глубины слова: «Физическая теория должна быть математически элегантна»). В то же время этой теории присуща совершенно неоспоримая доля «странности». И даже само слово «странность» вошло в научный лексикон. Дело

*) См. сборник «Над чем думают физики», вып. 2, Элементарные частицы, Физматгиз, 1963.



здесь, разумеется, не только в жизнерадостности и чувстве юмора пустивших его в обращение молодых в ту пору теоретиков. Природа действительно как бы проучила несколько успокоившихся физиков, с великолепной щедростью поднося им один сюрприз за другим.

Начиная с 1947 г. в таблице элементарных частиц появилась целая плеяда гиперонов и K-мезонов. Появилась нежданно-негаданно. Ни из какой теории они не вытекали. Это были «странные частицы». Так их и назвали. И частицы как будто поспешили оправдать свое название.

Мало того, что они явились нежданными, само их появление протекало как-то необычно. Эти частицы никогда не рождаются по одной — всегда парами или в еще большем количестве. Как будто ничего удивительного в этом нет. Ведь мы знаем уже немало примеров рождения пар: парой рождаются электрон и позитрон при столкновении γ-кванта с ядром, парами рождаются и другие частицы вместе с соответствующими античастицами. Но в том-то и дело, что пары странных частиц — совсем другого рода. Здесь нет группы частица — античастица. Вот, например, схема реакции

$$\pi^- + p \longrightarrow \Sigma^- + K^+.$$

Отрицательный π-мезон, сталкиваясь с протоном, порождает отрицательный Σ-гиперон и положительный K-мезон; Σ^- распадается далее на π-мезон и не оставляющий в камере следа нейтрон. Σ^- и K^+ вовсе не связаны соотношением частица — античастица. Аналогично положение и в других реакциях образования странных частиц. Почему? На этот вопрос

нужно было искать ответ где-то за пределами существовавшей к тому времени теории.

Однако дело не ограничивалось удивительной прихотливостью процессов рождения. Распады новых частиц были еще более «странными».

Посмотрим еще раз на только что написанную реакцию. В ней участвуют протон и π-мезон — явно сильно взаимодействующие частицы. Следовательно, и другие две частицы — как Σ-гиперон, так и K-мезон — тоже должны быть отнесены к разряду участвующих в сильных взаимодействиях.

И действительно, это подтверждается целым рядом как теоретических, так и прямых экспериментальных доводов: гипероны, например, отлично бы замещали нуклоны в ядре, не будь они так неустойчивы (о чем мы уже говорили, рассказывая о гиперядрах).

Итак, гипероны (будем для краткости говорить о них) — сильно взаимодействующие частицы. Это вполне соответствует также и тому, что рождаются гипероны очень «активно». Если так, то они с огромной «охотой» должны были бы выбрасывать π-мезоны, превращаясь при этом в нуклоны, скажем, по схеме

$$\Lambda^0 \longrightarrow p + \pi^-,$$

что, кстати, действительно и наблюдается.

Но вот удивительное дело. Такой процесс чем-то радикально тормозится. И не только этот. Поскольку гипероны — сильно взаимодействующие частицы, всем им, казалось бы, «полагается», едва возникнув, тут же распадаться. На это потребовалось бы столько же примерно времени, сколько нужно световому лучу, чтобы пройти расстояние, равное размерам одной частицы (а ведь свету достаточно десятой доли секунды, чтобы обежать земной шар по экватору). А что говорит опыт? Опыт говорит: гипероны живут в десятки миллиардов раз дольше, чем то «приличествует» сильно взаимодействующим частицам. Странно? Без сомнения,— но ведь и частицы «странные».

Однако сказанное не исчерпывает всех странностей. Если подсчитать «заряд», ответственный за

распад гиперонов, то получится нечто совсем удивительное (хотя, может быть, после всего сказанного и не столь удивительное): вместо константы сильного взаимодействия получится (причем с весьма убедительной точностью) — что бы вы думали? *Константа слабого взаимодействия!*

Цитируем опять обзор Гелл-Манна и Розенбаума: «...двигаясь прочь друг от друга непосредственно после своего рождения, странные частицы уходят от своей гибели посредством сильного взаимодействия и живут до тех пор, пока значительно менее вероятный слабый процесс не покончит с ними».

«Секрет долголетия» странных частиц

Итак, вне всякого сомнения, существуют какие-то обстоятельства, препятствующие «сильному» распаду странных частиц. Что же это за обстоятельства? Длительный опыт приучил физиков к мысли, что за любым «запретом» следует искать какие-то законы сохранения. Не могут протекать превращения, в которых нарушился бы закон сохранения заряда. Закон сохранения энергии «запрещает» процессы, в которых суммарная масса продуктов распада больше массы распадающейся частицы. Законы сохранения энергии и импульса приводят к тому, что при аннигиляции электрон-позитронной пары рождается не меньше двух γ-квантов.

Не означает ли «заторможенность» сильного распада гиперонов, что здесь проявляется какой-то новый, еще не замеченный физиками закон сохранения?

Такая гипотеза была выдвинута Гелл-Манном. Новую величину, которая сохраняется при сильных и электромагнитных взаимодействиях, назвали «странностью».

«Обычным» частицам, т. е. протону, нейтрону (и их античастицам), а также нейтральному и заряженным π-мезонам приписывалась нулевая странность. Для остальных сильно взаимодействующих частиц странность распределялась так:

странность, равная минус единице:

$$\Lambda^0,\ \Sigma^+,\ \Sigma^-,\ \Sigma^0,\ K^-,\ \tilde{K}^0;$$

странность, равная плюс единице:

$$\tilde{\Lambda}^0,\ \tilde{\Sigma}^+,\ \tilde{\Sigma}^-,\ \tilde{\Sigma}^0,\ K^+,\ K^0$$

(т. е. у соответствующих античастиц);

странность, равная минус двум:

$$\Xi^-,\ \Xi^0;$$

странность, равная плюс двум:

$$\tilde{\Xi}^-,\ \tilde{\Xi}^0.$$

Если реакция такова, что странность не меняется, то процесс идет по сильному каналу. Так, в уже приведенном примере

$$p+\pi^- \to \Sigma^- + K^+$$

исходные частицы имеют нулевую странность; Σ^- имеет странность —1, K^+ обладает странностью +1. Следовательно, и в «правой части» суммарная странность равна нулю. «Сильный» канал разрешен.

С другой стороны, распад

$$\Lambda^0 \to p + \pi^-$$

протекает с очевидным изменением странности на единицу (из —1 получается 0). Согласно новому закону сохранения такое превращение не может проходить по законам сильного взаимодействия. Парное рождение определяется именно сохранением странности. Подобно тому как существующие в советском альпинизме правила запрещают одиночные восхождения (на вершину может отправиться только по крайней мере двойка), закон сохранения странности выпускает в жизнь гипероны и K-мезоны только парами. Не будь этого закона, частицы немедленно гибли бы сразу же после своего рождения, что с альпинистами-одиночками происходит не всегда.

Чтобы внести большую наглядность в то, о чем мы здесь говорили, представьте себе, что некоторый процесс, идущий по «сильному каналу» (т. е. без изменения странности), длится одну секунду. Тогда на превращения с изменением странности на единицу потребовались бы десятки тысяч лет! А на случаи,

когда странность меняется на две единицы, нужны были бы невообразимо большие сроки, намного превосходящие возраст самой Земли.

Какие взаимодействия называются слабыми

Если вас теперь спросить: «Какие же взаимодействия называются слабыми»,— вы, вероятно, не сможете вразумительно ответить. Но в этом главным образом наша вина, а не ваша. Наш рассказ о слабых взаимодействиях никак нельзя назвать последовательным.

Впрочем, мы и не стремились к последовательности. Вначале хотелось дать представление, хотя бы отчасти, о том несколько хаотическом потоке идей и фактов, который имел место в действительности при исследовании слабых взаимодействий.

Теперь пора упорядочить те сведения об этих взаимодействиях, которыми ученые располагают сейчас. Такое упорядочение, кстати, произошло лишь в последние годы. Но несмотря на это, теория слабых взаимодействий далеко не достигла той степени совершенства, как квантовая электродинамика. Здесь еще, как бы ни были велики успехи, очень много загадочного. Несомненно, даже больше, чем известного. Не исключено, что мы не знаем самого главного. Не знаем даже, в чем это главное должно состоять.

Что же мы знаем, если говорить по возможности последовательно?

Если жизнь вообще и чтение этой книги, в частности, еще не притупили чудесную способность удивляться, то первый же факт может поразить.

Представьте себе: на лужайке вы увидели необыкновенный цветок, затерянный среди густой, высокой травы. Вы никогда не видели таких и уверены, что он единственный, как сказочный аленький цветочек. А вам вдруг говорят, что такие цветы повсюду. Лишь густая высокая трава закрывает их. И не нужно путешествовать к «чудищу безобразному», чтобы сорвать аленький цветочек.

Экзотическими представляются слабые взаимодействия: загадочное нейтрино, распад странных частиц — вот следы их деятельности. А на самом

деле это не так. Слабые взаимодействия совсем не являются экзотическими. Сейчас ученые считают, что эти взаимодействия *присущи всем элементарным частицам.*

Все дело в том, что в процессах, протекающих за счет действия электромагнитных или ядерных сил, слабые взаимодействия заметным образом не проявляют себя, оказываются в тени именно потому, что они слабы *). Ими можно просто пренебречь. Ведь пренебрегаем же мы гравитационными силами во всем, что касается элементарных частиц. Лишь в тех случаях, когда электромагнитные и ядерные силы ничего не могут сделать, слабые взаимодействия выступают на первый план. Только в этих случаях такое грубое макроскопическое существо, как человек, способно заметить их действие. На самом деле они возможно уступают в универсальности только гравитационным силам.

В начале этой главы много говорилось о нейтрино. Причина этого в том (если вы еще ее не уловили), что нейтрино — единственная частица, не испытывающая никаких взаимодействий, кроме слабого, если не говорить о еще более слабых гравитационных силах.

Все процессы, в которых появляется (или исчезает) нейтрино, обусловлены слабыми взаимодействиями. Именно поэтому изучение процессов с нейтрино наилучшим образом проливает свет на природу слабых сил.

Есть еще только одна группа процессов, в которых слабые взаимодействия оказываются решающими. Это процессы превращения частиц с изменением странности. Сохранение странности в сильных и электромагнитных взаимодействиях открывает простор для слабых сил, при действии которых по таинственным причинам странность не сохраняется.

Итак, к слабым взаимодействиям обычно относят все процессы с участием нейтрино и все взаимодействия, меняющие квантовое число — странность.

*) По крайней мере при энергиях, с которыми имеют дело современные экспериментаторы.

Универсальность слабых взаимодействий

Электрический заряд определяет скорость превращения заряженной частицы в ту же частицу плюс фотон *); константа сильных взаимодействий — превращения барионов друг в друга с испусканием мезонов. А константа слабых взаимодействий ответственна за самые разнообразные превращения частиц, как с участием нейтрино, так и без него, как с лептонами, так и с барионами. Откуда же берется такая универсальность?

Если вдуматься, то попытки объяснить одной причиной массу разнообразных превращений элементарных частиц могут показаться столь же мало перспективными, как попытки объяснить единой причиной вымирание древних ящеров и появление на земном шаре китов и кашалотов.

Однако это не так. Была высказана гипотеза, объясняющая природу универсальности слабых взаимодействий.

В слабых взаимодействиях, согласно этой гипотезе, всегда участвуют *четыре частицы*, имеющие спин $\frac{\hbar}{2}$. Четыре фермиона, как часто называют частицы со спином, равным половине постоянной Планка. *Универсальность слабых взаимодействий состоит в том, что взаимодействие двух фермионных пар построено одинаковым образом и характеризуется одной и той же константой связи.* Пары взаимодействующих фермионов могут быть самыми различными. Требуется только, чтобы каждая пара содержала одну заряженную и одну нейтральную частицу. Лептоны группируются в свои пары: электрон — электронное нейтрино, μ-мезон — мюонное нейтрино, а барионы — в свои. Но каковы бы ни были эти пары, слабое взаимодействие между ними всегда одно и то же.

В мире живых существ этому соответствовала бы довольно фантастическая картина. Закон преобразования семейной пары Ивановых в ту же пару, но

*) За упомянутым ранее исключением: распады π^0-мезона и Σ^0-гиперона.

в новом состоянии был бы точно таким же, как закон преобразования слона и ехидны в кенгуру и черепаху.

Здесь, естественно, читатель должен выступить с протестом. «Сходство между превращениями элементарных частиц и трансмутацией слона в кенгуру заведомо преувеличено. Но где же можно усмотреть объяснение универсальности слабых взаимодействий, если учесть возможность подобных параллелей? Ведь у вас фактически речь идет о том, как в рамках теории увязать необычайные факты, а не о том, как их объяснить».

На это можно ответить примерно так. Ну что же, в значительной степени дело обстоит именно таким образом. В первую очередь задача физиков состоит в том, чтобы увидеть то общее, что скрывается за бездной разрозненных фактов. Открыть (или угадать) общий закон. А почему в природе действует этот общий закон? Здесь мы опять-таки, как и в других случаях до этого, ничего сказать не в состоянии. По крайней мере в настоящее время.

Не нужно только думать, что угадать четырехфермионный характер слабых взаимодействий было легко. Отнюдь нет! В случае, скажем, распада нейтрона и μ-мезона это непосредственно очевидно:

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e,$$
$$\mu^- \longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

Здесь все четыре взаимодействующих фермиона налицо.

А теперь посмотрите на распады π-мезона и Λ^0-гиперона, вызванные тоже слабыми взаимодействиями:

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu,$$
$$\Lambda^0 \longrightarrow p + \pi^-.$$

Здесь непосредственно участвуют только по два фермиона. Тем не менее и данные реакции вызываются четырехфермионным слабым взаимодействием, но все происходит много сложнее.

Эти реакции идут в два этапа, и на одном из этапов в качестве промежуточного состояния возни-

кает нуклон-антинуклонная пара, которая затем аннигилирует, причем важно, что это промежуточное состояние существует столь малое время, что квантовая неопределенность энергии, о которой мы уже говорили, позволяет реакции идти. С классической точки зрения реакция была бы невозможна, так как ее течение не согласуется с законом сохранения энергии в классическом понимании.

Реакцию распада π^+-мезона (то же, конечно, относится и к распаду π^--мезона) следует рассматривать так. На первом этапе π^+-мезон превращается в пару протон — антинейтрон за счет сильного взаимодействия. Затем эта пара уже за счет слабых четырехфермионных взаимодействий превращается в μ^+-мезон и мюонное нейтрино:

$$\pi^+ \xrightarrow[\text{взаимодействие)}]{\text{(сильное}} p+\bar{n} \xrightarrow[\text{взаимодействие)}]{\text{(слабое}} \mu^+ + \nu_\mu .$$

Мы в состоянии наблюдать лишь начальное и конечное состояния, и поэтому здесь четырехфермионный характер слабого взаимодействия оказывается замаскированным.

При распаде Λ^0-частицы она за счет слабых взаимодействий сначала превращается в протон и пару нейтрон — антипротон. При этом странность изменяется на единицу:

$$\Lambda^0 \longrightarrow p+\bar{p}+n.$$

Затем нейтрон-антипротонная пара аннигилирует за счет сильных взаимодействий, превращаясь в π^--мезон:

$$\bar{p}+n \longrightarrow \pi^-,$$

а возникший на первом этапе реакции протон продолжает существовать. В целом реакция выглядит так:

$$\Lambda^0 \xrightarrow[\text{взаимодействие)}]{\text{(слабое}} p+\bar{p}+n \longrightarrow p+\pi^-.$$

(сильное взаимодействие)

Сходным образом обстоит дело и при других реакциях. Однако многие проблемы ждут здесь еще разрешения.

Гипотеза Вайнберга

Прошло не так уж много лет с тех пор, как была написана только что прочитанная сейчас вами последняя фраза. Мы решили оставить ее, дабы по контрасту рельефнее предстали перед читателем те значительные изменения, которые здесь произошли в недавнее время.

Дело не только в накоплении экспериментальных фактов, в углублении и расширении фронта исследований. Произошло нечто более значительное — возникла и уже обрела довольно основательные «права гражданства» новая физическая идея. Идея глубокого родства и единства электромагнитных взаимодействий со слабыми. Первым ее выдвинул в Гарварде профессор Вайнберг. Конечно, физические теории не возникают на пустом месте. Гипотезе Вайнберга предшествовали многочисленные теоретические исследования, в частности, относившиеся к вопросу о промежуточном бозоне.

Промежуточный бозон

Этот вопрос возник в теории слабых взаимодействий сравнительно давно. Как мог заметить внимательный читатель, существует заметное отличие слабых взаимодействий от всех остальных. Электромагнитное взаимодействие осуществляется посредством электромагнитного поля. Кванты этого поля — фотоны — являются переносчиками взаимодействия между электрически заряженными частицами.

Переносчиками ядерного взаимодействия являются, в основном, π-мезоны. О переносчиках же слабого взаимодействия мы не написали ни слова.

Действительно, долгое время принималось, что все четыре фермиона взаимодействуют в одной точке и безо всяких посредников. При таком подходе не может быть речи о каком-либо поле слабых взаимодействий, о квантах слабого взаимодействия.

Откуда такая исключительность слабых взаимодействий и существует ли она в действительности? Может быть, более внимательный анализ позволит установить, что существует поле слабых взаимодействий и что, соответственно, должны существовать частицы — переносчики этого взаимодействия. Такая

гипотеза возникла уже довольно давно. Она вовсе не находится в явном противоречии с предшествовавшей ей физической картиной точечных четырехфермионных взаимодействий. Поскольку «радиус взаимодействия» как мы уже знаем, тем меньше, чем больше масса переносящих взаимодействие квантов, «неточечное взаимодействие» тем менее отличается от «точечного», чем тяжелее квант поля взаимодействия. Даже обмен π-мезонами приводит к взаимодействиям, ощутимым лишь на очень малых расстояниях порядка 10^{-13} *см.* Приписав же квантам — переносчикам слабого взаимодействия бóльшую массу (забегая вперед скажем, что она должна превосходить π-мезонную более чем на два порядка), мы придем к таким взаимодействиям, которые действительно необычайно трудно отличить от точечных — различие проявляется на ничтожно малых даже по микроскопическим масштабам расстояниях порядка 10^{-14} *см.*

По выражению Л. Б. Окуня, при этом промежуточная частица как жесткая пружина связывает между собой пары частиц. Если энергия, передаваемая пружине при столкновениях, мала по сравнению с ее жесткостью, пружина выступает как твердое тело — этому соответствует точечное взаимодействие, когда перенос взаимодействия квантами фактически не сказывается. Если же энергия велика, то пружина деформируется — и это можно обнаружить экспериментально.

Гипотеза о квантах, обмен которыми ответствен за слабые взаимодействия, развивалась в нескольких направлениях: нужно было понять, какими свойствами должны быть наделены эти кванты, какие эксперименты можно и нужно здесь поставить и истолковать и, наконец, как отразится эта гипотеза на самой логической и математической структуре теории.

На первый из этих вопросов все отвечали единодушно: нужно рассматривать массивную частицу со спином, равным единице (в единицах $\hbar$), такие частицы называются тяжелыми векторными бозонами. Именно такой вариант — и только он — мог удовлетворить требованиям имевшегося в то время эксперимента. Что касается электрического заряда этой частицы, то он принимался как положительным, так

и отрицательным, но не равным нулю — как оказалось позже, без достаточных оснований.

Трудности теории

Как правило, физики-теоретики должны удовлетворяться приближенным решением тех уравнений, которые призваны описывать исследуемые объекты. Особенно часто используется метод последовательных приближений, когда «в нулевом приближении» взаимодействие вообще не учитывается, «в первом приближении» рассматривается однократный акт взаимодействия, «во втором» — двукратный и т. д.

Так вот, в теории слабых взаимодействий ситуация довольно необычна. «Первый порядок», или, иначе говоря, первое приближение, неплохо (хотя и не безупречно) описывает многие экспериментальные факты. Второй — и более высокие — порядки, казалось бы, должны приводить лишь к ничтожным поправкам, поскольку взаимодействие потому и называется слабым, что «константа взаимодействия» относительно мала, т. е. акты взаимодействия осуществляются сравнительно очень редко.

Прямое же вычисление приводит в действительности далеко не к такому результату: вклад от второго и более высоких порядков оказывается бесконечно большим.

Появление в теории расходимостей — так принято называть бесконечно большие значения, которые появляются в теории при вычислении каких-либо физических величин,— всегда говорит о неблагополучном положении в этой теории, о том, что здесь имеется некая нерешенная пока еще проблема. Проблема расходимостей, как говорилось ранее, возникает уже в квантовой электродинамике. Здесь, однако, удается при помощи так называемой «перенормировочной процедуры» добиться того, чтобы теория давала для всех наблюдаемых величин разумные конечные значения. Однако, оказывается, далеко не все теории допускают проведение такой процедуры, или, иначе говоря, являются перенормируемыми. Дело здесь в том, что если бесконечно большими получаются значения лишь для ограниченного числа физических величин (например, только для заряда

частиц и их массы), то можно, отказавшись от теоретического определения этих величин, просто использовать их экспериментальные значения. Для всех же остальных величин при этом получаются конечные значения, что и делает теорию работоспособной. Значительно хуже, если число типов расходимостей само становится неограниченно большим, как то и получается в случае теории слабых взаимодействий. Такая теория именуется неперенормируемой, т. е. фактически, внутренне противоречивой. Гипотеза о тяжелом заряженном векторном бозоне не исправляет положения, теория остается неперенормируемой, а некоторые трудности даже усугубляются.

Поиски выхода из этого, действительно не очень приятного, положения привели к рождению нового и довольно неожиданного направления. Почти одновременно С. Вайнберг в Америке и А. Салам в Триесте независимо выдвинули упомянутую выше смелую гипотезу о единстве слабого и электромагнитного взаимодействий.

Черты единства

Некоторые черты этого единства можно было подметить и раньше; в первую очередь, бросается в глаза, что кванты — переносчики и электромагнитного и слабого взаимодействий имеют одинаковый спин (равный $\hbar$). Только фотоны, обмен которыми приводит к электромагнитным взаимодействиям, не имеют массы покоя, тогда как векторным мезонам, переносящим слабые взаимодействия (их обычно обозначают W-бозонами), следует приписать довольно значительную массу.

Но единство, о котором идет речь, далеко не исчерпывается только векторностью промежуточных частиц. Очень важную роль играет и еще одна гипотеза о том, что не нужно вводить различных «зарядов» для электромагнитных и для слабых взаимодействий, что заряд — один, обычный элементарный заряд (или удобнее брать не e, а так называемую постоянную тонкой структуры $\alpha = e^2/\hbar c$).

Первое впечатление — что эта гипотеза находится в явном противоречии с тем очевидным фактом, что слабые взаимодействия тем и оправдывают свое название, что они значительно слабее электромагнитных.

Однако это возражение при более тщательном анализе отпадает. Здесь, как оказывается, решающее значение приобретает масса покоя промежуточных квантов. Расстояние, на которое может «улетать» такой квант от породившего его источника, имеет порядок $\hbar/mc$. Для фотонов $m=0$ (масса покоя у них, как уже не раз говорилось выше, отсутствует). Поэтому фотоны могут залетать очень далеко, или, иначе говоря, радиус электромагнитных взаимодействий бесконечно велик.

Иное дело — тяжелые W-бозоны. Даже если они испускаются источником так же часто, как фотоны (а в этом и заключается обсуждаемая нами гипотеза), то, поскольку «область их обитания» ничтожно мала, только на очень маленьких расстояниях может проявиться совпадение «истинной величины» слабых и электромагнитных взаимодействий. Но такие малые расстояния — большая редкость; значительно вероятнее, что расстояние между частицами окажется больше «радиуса взаимодействия» $\frac{\hbar}{M_W c}$. Это приводит к ослаблению взаимодействия. Формально это отражается в теории в том, что роль эффективной константы взаимодействия играет не α, а величина, пропорциональная $\frac{\alpha}{M_W^2}$, — именно эта — теперь уже не «основная», а «производная» величина становится при новом подходе на место универсальной константы слабых взаимодействий.

Перенормируемость

Теория Вайнберга имеет много привлекательных черт. И одна из главных заключается в том, что эта теория перенормируема. Число перенормируемых теорий, т. е. теорий, в которых переопределение конечного числа физических параметров позволяет устранить все бессмысленные бесконечные величины, очень невелико — чтобы пересчитать такие теории, более чем достаточно пальцев на одной руке. Поэтому каждый новый вариант такой теории вызывает большой интерес. И особенно важным представляется тот факт, что именно попытка единого рассмотрения двух типов взаимодействия приводит к перенормируемой

теории — ведь иначе теория не могла бы вызывать большого доверия.

У Вайнберга перенормируемость достигается тем, что кроме фотонов и заряженных (W^+ и W^-) векторных бозонов рассматриваются еще и нейтральные векторные бозоны (их обычно обозначают Z). При надлежащем подборе масс (Z-бозон должен быть вдвое тяжелее W, масса же W получается почти в 40 раз больше, чем у протона) часть бесконечностей взаимно уничтожается, а остающиеся расходимости удается устранить применив перенормировочную методику.

Когда была доказана перенормируемость теории Вайнберга, интерес к ней резко возрос. Однако в еще большей мере этот интерес усилился, когда экспериментаторы обнаружили некоторые из эффектов, предсказанных этой теорией. Не только физические журналы, но и массовые издания в 1973 г. оповестили читателей об открытии нейтральных токов. Что же это за токи?

Нейтральные токи

Как уже говорилось выше, первые попытки введения в теорию промежуточного векторного бозона основывались на предположении, что этот бозон должен нести электрический заряд. Обмениваясь таким бозоном, два взаимодействующих объекта обмениваются и зарядом. Если же допустить, что переносчиком взаимодействия может быть и нейтральный бозон, то возникают очень интересные и, что особенно ценно, поддающиеся непосредственной экспериментальной проверке новые теоретические предсказания, к обсуждению которых мы еще вернемся.

Может показаться, что обмен нейтральным бозоном или обмен одновременно двумя W-бозонами, противоположными по электрическому заряду, должны давать близкие результаты, тем более, что масса Z как раз вдвое больше массы W. Однако из-за малости константы взаимодействия одновременный обмен парой бозонов оказывается значительно менее вероятным, чем «переброс» одного кванта. Именно по этой причине можно фиксировать внимание только на однобозонном обмене, пренебрегая многобозонными поправками.

После этого пояснения делается очевидным, что, вводя в рассмотрение нейтральный бозон, мы устраняем запрет на многие реакции. Так, например, такой бозон может переносить взаимодействие между нейтрино и такими частицами, как электрон, протон, нейтрон, так что экспериментально должно наблюдаться рассеяние нейтрино на этих частицах. До введения нейтрального бозона запрет распространялся и на такую, к примеру, реакцию

$$\nu_\mu + p \longrightarrow \nu_\mu + n + \pi^+,$$

которую можно истолковать так: мюонное нейтрино ν_μ, пролетая вблизи протона p, воздействует на него так, что протон, испустив π^+-мезон, превращается в нейтрон.

Но что за квант может быть передатчиком взаимодействия? Очевидно, только некоторая нейтральная частица — ведь и поглощение и испускание заряженных частиц мюонным нейтрино невозможно.

Таким образом, указанная реакция является одним из примеров эксперимента, в котором проявляется нейтральный промежуточный бозон. Другим примером является реакция

$$\nu_\mu + \mu^+ \longrightarrow \nu_\mu + n + \pi^+.$$

Число таких примеров можно было бы значительно увеличить.

В электродинамике источником, испускающим и поглощающим фотоны, является ток. Термин «ток» естественно переносится и на источники поглощения и испускания любых промежуточных квантов. Поскольку при обмене нейтральными квантами «ток» не меняет заряда (он может быть, в частности, связан с движением незаряженных частиц), такие токи назвали нейтральными. Экспериментальное обнаружение нейтральных токов впервые произошло уже в 1973 г., после чего продолжали появляться все новые и более полные данные, полученные как зарубежными, так и нашими исследователями. Открытие нейтральных токов — одно из значительнейших недавних достижений в физике.

Почему массы бозонов различны

Увлекшись нейтральными токами, мы упустили из виду один довольно важный момент, касающийся единой теории (или, может быть, пока еще нужно сказать «программы описания») электромагнитных и слабых взаимодействий. Мы установили, что между фотонами и W-бозонами есть нечто общее: все эти частицы (или, если хотите, поля) имеют одинаковый собственный момент количества движения, т. е. спин. Но не мало ли этого, чтобы говорить о «родственности» этих частиц, считать их представителями некоего общего семейства? У них ведь такие различные массы!

При всем том, установление такой родственности необходимо, чтобы можно было с достаточным основанием говорить о единой природе слабых и электромагнитных взаимодействий.

Да простит нам читатель небольшое отступление.

Поговорим о «родственности». Часто ли бывает, что даже близкое родство мы способны подмечать с первого взгляда? И здесь вовсе не обязательно иметь в виду родственные узы у людей. Так ли уж похожа помещающаяся на ладони болонка на громадного дога? Земляника на арбуз? Или крохотная искорка, проскакивающая, когда мы щелкаем выключателем,— на распарывающую небо молнию?

Чтобы обнаружить черты общности, недостаточно просто «посмотреть» — нужно понять. Понять и причины общности, и истоки различия.

Физики уже давно подметили, что элементарные частицы довольно естественно разбиваются на группы, внутри каждой из которых явственно просматривается общность. Чтобы не забегать вперед (об этом нам еще предстоит говорить), ограничимся хотя бы одним примером: π^+-, π^-- и π^0-мезоны не зря даже по названию почти одинаковы. Это не три разные частицы, а три различных «зарядовых проявления» одной и той же частицы, иначе говоря, по отношению ко всем взаимодействиям (кроме электромагнитного!) все π-мезоны выступают абсолютно одинаково.

Пример π-мезонов, казалось бы, может только помешать нашей попытке свести фотон, W- и Z-бозоны в одно семейство. Ведь у всех π-мезонов почти одина-

ковые массы, а здесь массы варьируются от нуля для фотона до примерно восьмидесяти протонных масс у Z-бозона!

Несмотря на этот очевидный факт, глубочайшая общность может все же быть обнаружена. Различие в массах является не первичным и изначальным, а возникает в результате спонтанного нарушения симметрии.

Прочитав последнюю фразу, многие читатели наверняка ничего не поняли. Что это за «изначальное» различие, или, наоборот «отсутствие различия» и что это за загадочная «симметрия» и как понять ее спонтанное нарушение?

Термин «симметрия», о котором мы уже говорили прежде, употребляется сейчас в физике очень часто. Им пользуются всегда, когда хотят отметить, что физические объекты обладают чертами, не изменяющимися при тех или иных изменениях условий. Могут существовать и приближенные симметрии. Так, в уже упомянутом примере с π-мезонами симметрия между этими частицами нарушается электромагнитными взаимодействиями.

Можно, однако, указать много случаев, когда симметрия нарушается спонтанно, т. е. самопроизвольно. Так обстоит дело всегда, когда симметричное состояние отвечает неустойчивому равновесию.

Представьте себе, например, что перед вами жидкость. Она изотропна, т. е. все направления в ней равноправны. Пусть эта жидкость медленно охлаждается до температуры кристаллизации. После кристаллизации изотропия может нарушиться (возникает анизотропия), ведь в кристаллах, как правило, существуют выделенные направления, так что многие физические свойства определяются этой анизотропией. Как же заранее узнать, какими будут эти направления в том кристалле, который получится из изотропной жидкости? О, это очень трудный вопрос. Чтобы в нем разобраться, нам пришлось бы заняться флуктуациями, что нам теперь вовсе ни к чему. Нам важно лишь понять, что охлажденная, или даже переохлажденная, жидкость оказывается в положении неустойчивого равновесия, и как только возникает центр кристаллизации (а, значит, и зародыш «выделенных

направлений»), все вещество быстро переходит в новое, более устойчивое положение равновесия, происходит кристаллизация.

Приведем еще один пример: вы поставили карандаш на острие. «В принципе», конечно, такое положение равновесия возможно, но реально оно недостижимо. Достаточно как угодно малых возмущений — и карандаш упадет. Но куда ему «выгоднее» падать — направо или налево? Конечно, безразлично! В этом смысле все направления совершенно симметричны. Но уж если падение началось, например, направо, то «заложенная» в исходные условия (т. е. в уравнения движения и в начальные условия) симметрия сразу же нарушается.

Падение карандаша направо или налево может иметь весьма различные последствия — например, выпадет ли он на улицу, или упадет в комнату. Но за все эти различия вовсе не ответственны какие-то конечные внешние воздействия, нарушающие симметрию; здесь перед нами именно пример спонтанного ее нарушения.

Конечно, это всего лишь аналогия. Но аналогия довольно глубокая. В теории Вайнберга различие в массах частиц, переносящих взаимодействие, также не «закладывается» в исходные динамические уравнения, которые в этом смысле обладают симметрией. Однако теория эта такова, что в ней возникает спонтанное нарушение симметрии, приводящее к появлению значительного расщепления по массам у различных бозонов. Именно это обстоятельство маскирует «изначальное» единство этих частиц, а, тем самым, и единство природы электромагнитных и слабых взаимодействий.

Теория, о которой мы только что вкратце рассказали, возникла недавно. Далеко не все еще в ней ясно и закончено. Может быть, потребуется уточнение каких-то положений. Но основная идея представляется такой глубокой и увлекательной, что невольно хочется верить, что произошло возникновение нового этапа в физике — этапа, отличительной особенностью которого является уменьшение числа типов фундаментальных взаимодействий, открытие единства там, где о нем прежде и не подозревали.

3.

Нейтрино во Вселенной

Вернемся еще раз к вопросу о той роли, которую играют нейтрино во Вселенной. Мы уже привыкли к тому, что эта частица охотно вторгается во все области. В звездах происходит ряд процессов, сопровождающихся испусканием нейтрино. Нетрудно понять, в чем здесь дело. Ведь основной источник энергии звезд — реакции слияния ядер. В цепи процессов, приводящих в конце концов к превращению четырех протонов в α-частицу (ядро гелия), возникают два позитрона, что обязательно должно сопровождаться вылетом двух нейтрино. Позитроны аннигилируют с электронами, а нейтрино покидают звезду. На каждый квадратный сантиметр поверхности Земли только от Солнца ежесекундно попадает более 10^{11} нейтрино.

Кроме того, в мировом пространстве происходят распады элементарных частиц — мезонов и гиперонов. Все эти распады сопровождаются рождением нейтрино и антинейтрино.

Какова же дальнейшая судьба нейтрино? Эти всепроникающие частицы, разумеется, наверняка пройдут сквозь толщу звезды, если даже они и зародились где-то в ее недрах, и улетят, унося с собой причитающуюся на их долю энергию. При малой плотности Вселенной нейтрино пролетят ее насквозь, не поглотившись. Поэтому *нейтрино должны накапливаться во Вселенной.*

Кроме того, не исключена возможность, как мы увидим в дальнейшем, что на первой стадии расширения Вселенной нейтрино вообще составляли значительную часть вещества Вселенной. В основном эти нейтрино сохранились до сих пор, потеряв, правда, при расширении Вселенной значительную часть своей энергии.

Если бы мы умели строить «нейтриноприемники» такой же чувствительности, как и радиоприемники! Сколько необычайно важных сведений мы смогли бы получить! Мы получили бы возможность «заглянуть» в центр самых больших звезд. Ведь нейтрино выры-

ваются оттуда и уносят с собой какие-то «воспоминания» о процессах, сопровождавших их рождение. Нейтрино позволили бы «просветить» целые галактики неизмеримо лучше, чем рентгеновские лучи просвечивают лист бумаги.

Уже сейчас ученые начинают конструировать приборы, приближающие нас к эре нейтринной астрономии. Первые успехи налицо. Группа американских физиков обнаружила нейтрино высокой энергии, рождаемые космическими лучами. (Вспомните, что чем выше энергия нейтрино, тем больше вероятность взаимодействия его с веществом). Детектор нейтрино, устроенный в принципе так же, как и первая установка по обнаружению нейтрино, о которой шла речь ранее, был установлен в шахте на глубине 600 *м*. Сквозь такую толщу Земли ни одна космическая частица, кроме нейтрино, проникнуть не могла.

Но нейтрино более низкой энергии, порождаемые внутри звезд, все еще не обнаружены. Реально, конечно, речь может идти об обнаружении солнечных нейтрино.

В шахте копей Южной Дакоты (США) на глубине 1490 *м* была создана установка для детектирования солнечных нейтрино с использованием (по предложению Б. Понтекорво) реакции

$$\nu_e + Cl^{37} \longrightarrow Ar^{37} + e^-.$$

Под действием нейтрино ядро хлора превращается в радиоактивное ядро аргона. Это ядро претерпевает *K*-захват с временем жизни 35 дней.

Цилиндрический бак содержал 380 000 литров C_2Cl_4. Возникавший аргон экстрагировался пропусканием через бак 20 000 литров гелия. Затем аргон вымораживался охлаждением до температуры 77K.

Эксперименты продолжались несколько лет, но в результате нейтрино обнаружено не было. В то же время теоретические расчеты показывали, что поток нейтрино от Солнца достаточно интенсивен, для того чтобы они регистрировались созданной установкой. Возможно, что при этих расчетах температура внутри Солнца полагалась слишком большой ($14{,}9 \cdot 10^6$K).

Впрочем, даже сейчас, не имея сколько-нибудь надежных «нейтриноприемников», мы благодаря этим частицам увидели многое в эволюции Вселенной и звезд, о чем раньше не подозревали.

Эволюция звезд

Общее мнение сейчас таково, что звезды образовались в результате гравитационной конденсации разреженного газа, в основном водорода. Гравитационные силы, сжимая вещество, вызывают его нагрев. Когда температура достигает нескольких десятков миллионов градусов, начинаются термоядерные реакции. В дальнейшем непрерывное горение звезд происходит именно за счет них. Звезды «питаются» водородом, превращая его в гелий, что сопровождается выделением гигантских энергий. Но запасы горючего в любой звезде ограничены. Что же произойдет в ней после выгорания водорода?

В стационарном состоянии, когда запасы горючего еще велики, звезды находятся в равновесии, так как гравитационное давление, стремящееся спрессовать звезду, уравновешивается давлением газовых частиц, слагающих звезду, и световым давлением *). По мере выгорания водорода в центральных областях звезды она начнет сжиматься. Важно, что температура звезды будет при этом увеличиваться за счет уменьшения гравитационной энергии, вызванного сжатием.

При температурах в сотни миллионов градусов при столкновении трех ядер гелия в достаточно массивных звездах образуются ядра углерода. Сталкиваясь с ядрами гелия, вновь образованные ядра дают кислород, неон и т. д.

Такого рода процесс оканчивается на ядрах железа, так как все предшествующие реакции ведут к выделению энергии, а при образовании ядер более тяжелых, чем железо, энергия поглощается. Впрочем, для звезд малой массы процесс оканчивается на более легких ядрах, например ядрах марганца.

В результате, если масса звезды меньше 1,2 массы Солнца, возникает устойчивая конфигурация, известная под названием белого карлика. Наиболее извест-

*) При высоких температурах звезды ее вещество находится в состоянии ионизированного газа (плазмы).

ным белым карликом является спутник Сириуса — маленькая звездочка, теряющаяся в лучах своего яркого соседа.

Белые карлики — это возможная конечная стадия эволюции звезд. Светимость этих звезд мала, но при массе порядка массы Солнца радиус всего лишь порядка радиуса Земли или Урана. Плотность белых карликов громадна: 10^8 *г/см*^{3}! В этих условиях атомы полностью ионизированы и звезда состоит из плотно упакованных ядер и электронов.

Белые карлики — не единственно возможная конфигурация звезды после выгорания ядерного горючего. Если масса звезды больше 1,2 массы Солнца, то, начиная с некоторого момента, при большом сжатии звезды электроны начинают «втискиваться» в ядра и посредством реакции

$$e^- + p \rightarrow n + \nu$$

превращают протоны в нейтроны. Нейтрино покидают звезду, а нейтроны остаются.

Этот процесс «нейтронизации» звезды приводит к катастрофически быстрому ее сжатию. В конце концов возникает из обычной стабильная нейтронная звезда радиусом всего лишь в несколько километров с небольшой примесью электронов и протонов. Вещество имеет при этом чудовищную плотность: 10^{14} *г/см*^{3}. Это ядерная плотность.

Распад нейтронов в звезде по обычной схеме

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

оказывается невозможным из-за принципа Паули. Вот в чем здесь дело.

Область движения электронов ограничена размерами звезды. При ограниченном же движении согласно квантовой механике энергия электрона не может быть произвольной. Как и в атоме, возможны только определенные прерывные значения энергии. Если представить себе звезду в виде ящика, заполненного электронами и другими частицами, причем так, что чем больше энергия частицы, тем выше она расположена над дном ящика, то следует мыслить этот ящик со множеством отдельных полочек. Положению на опреде-

ленной полочке соответствует определенная энергия частицы. Есть полочки для электронов, протонов и т. п.

Согласно принципу Паули не существует двух электронов в одном состоянии. Поэтому на одной электронной полочке находится не более двух электронов с противоположно направленными спинами. При не слишком больших температурах все нижние полочки вплоть до некоторой, соответствующей максимальной энергии E_m электрона, будут заполнены. Электронный газ, как говорят, будет находиться в состоянии вырождения, иметь минимально возможную по квантовой механике энергию *).

Так вот, нейтрон не может распасться, если энергия возникающего при распаде электрона меньше максимальной. Ведь все нижние энергетические полочки уже заняты. Все происходит так, как если бы нейтрон «знал», что он не может распасться, не нарушив законов квантовой механики, и потому остается стабильным.

Сжатие звезды должно, как и в случае белых карликов, сопровождаться увеличением температуры. Но теперь уже на некоторое время температура поднимается настолько, что звезда может излучать рентгеновские лучи.

Вполне возможно, что резкое сжатие настолько повысит температуру, что произойдет взрыв. Тогда мы будем наблюдать появление сверхновой звезды.

В 1967—1968 гг. нейтронные звезды были открыты экспериментально. Группа исследователей из Кембриджа с помощью радиотелескопа обнаружила пульсирующее излучение на длине волны 3,7 *м*. Регулярные импульсы следовали с интервалами, чуть большими одной секунды. Вначале ученые подумали, не являются ли эти импульсы сигналами другой цивилизации. На некоторое время из-за этого публикация статьи была задержана. Но затем были обнаружены новые объекты, излучающие радиоимпульсы с другими интервалами. Эти объекты получили название *пульсаров*.

*) Заметим попутно, что у белых карликов электронный газ также находится в вырожденном состоянии.

Пульсары представляют собой быстро вращающиеся нейтронные звезды. Если такая звезда излучает электромагнитные волны лучеобразно в определенном направлении (вероятнее всего, в направлении магнитной оси звезды), то излучение в любом направлении будет пульсировать с частотой, равной частоте ее вращения вокруг оси.

К 1974 г. было открыто более 130 пульсаров. Причем некоторые из них излучают импульсы не только радиоволн, но и видимого света или даже рентгеновских лучей.

Сейчас нет сомнений в том, что пульсары — нейтронные звезды, так как никакая другая звезда не может вращаться с угловой скоростью от 33 микросекунд до 3,5 секунд (измеренные периоды между импульсами для различных пульсаров). Ее разорвали бы центробежные силы.

Нейтронная звезда будет представлять собой устойчивую конфигурацию, если ее масса не превышает удвоенную массу Солнца. А что будет со звездой при большей массе?

Согласно теории Оппенгеймера и Снайдера звезда будет неограниченно сжиматься, уходя под свой гравитационный радиус. Стационарное состояние звезды невозможно. Происходит так называемый гравитационный коллапс.

Гравитационный радиус определяет критические размеры тела, и кроме массы он зависит еще от скорости света c и гравитационной постоянной $\varkappa$:

$$r_0 = \frac{2m\varkappa}{c^2}.$$

Ни одна частица, как вытекает из теории гравитации Эйнштейна, не может быть в покое внутри сферы, ограниченной гравитационным радиусом. Все излучения и сигналы могут распространяться только к центру. Они падают на центр неудержимо, но для внешнего наблюдателя это падение будет продолжаться бесконечно долго из-за сильнейшего замедления хода времени в огромном гравитационном поле звезды.

Перед внешним наблюдателем при этом должна предстать следующая картина.

Светимость звезды при гравитационном коллапсе очень быстро уменьшается и одновременно звезда «краснеет». В сильном гравитационном поле звезды длины волн излучения увеличиваются. Уже через доли секунды после начала заметного покраснения звезда перестает быть видимой и образует черную дыру. Свет не в силах преодолеть гравитационное притяжение и оторваться от звезды. Звезда с массой, превышающей массу Солнца более чем в три раза, превращается в абсолютно черный шар размерами всего лишь в несколько десятков километров. Только мощное гравитационное поле вокруг черной дыры свидетельствует о ее существовании.

Всего лишь несколько лет назад казалось, что обнаружить черную дыру практически невозможно, хотя наша Галактика содержит, возможно, миллионы черных дыр. Однако в настоящее время по крайней мере одна черная дыра в созвездии Лебедь X-1 обнаружена.

В 60-х годах обратили внимание на то, что черную дыру можно заметить в системах двойных звезд, в которых одна из звезд является нормальной. По эффекту Допплера можно обнаружить обращение этой нормальной звезды вокруг общего с черной дырой центра тяжести и оценить массу черной дыры.

Но одной оценки массы невидимой звезды (она более чем в три раза должна превышать массу Солнца) в системе двойных звезд еще недостаточно. Может быть, вторая звезда просто очень мало излучает. Однако в 1964 г. было показано, что черная дыра в тесной двойной системе стягивает к себе газ со своей звезды-спутника. Этот газ при падении на черную дыру настолько сильно разогревается, что может испускать рентгеновское излучение. Гравитационное поле нормальной звезды для этого слишком мало. И вот, в созвездии Лебедь X-1 обнаружен компонент нормальной звезды с массой, в 8 раз превышающей массу Солнца. Одновременно этот объект является источником рентгеновского излучения. Это с очень большой долей вероятности свидетельствует о существовании черной дыры в созвездии Лебедь X-1. Но все же далеко не все ученые считают приведенные соображения бесспорными.

Ранняя стадия эволюции Вселенной

Говоря о расширяющейся Вселенной, мы уже упоминали об одной из самых кардинальных проблем: из чего состояло вещество Вселенной в момент ее максимального сжатия? Начальное состояние Вселенной должно быть таково, чтобы оно в принципе позволяло объяснить ту картину Вселенной, которую мы наблюдаем сейчас.

Было высказано предположение, что в сверхплотном состоянии Вселенная состояла из холодных нейтронов. По тем же причинам, что и внутри нейтронной звезды, нейтроны не будут распадаться.

В первый момент Вселенная расширяется крайне быстро, и через 15 минут после начала расширения ее плотность должна равняться плотности воды. При расширении «энергетические полочки» для электронов располагаются в соответствии с законами квантовой механики все ближе друг к другу, так что очень скоро энергия электрона на самой верхней занятой полочке станет меньше энергии электрона, возникающего при распаде нейтрона. Поэтому нейтроны начнут распадаться и появятся протоны.

При столкновении протонов с нейтронами образуются ядра тяжелого водорода — дейтоны. Дейтоны сталкиваются друг с другом и с протонами, образуя ядра гелия и сверхтяжелого водорода — трития. В результате Вселенная очень быстро обеднеет протонами. Такова ситуация в данной модели. В действительности же на первой стадии эволюции Вселенной вещество на 70% состояло из водорода. Звезды ярко горят сейчас именно потому, что запасы водорода в них были очень велики. Поэтому нейтронная гипотеза первичного состояния Вселенной отпала.

Оказались несостоятельными и все другие теории холодной в начальном состоянии Вселенной. Это было более или менее ясным после того, как в 1965 г. было обнаружено космическое тепловое излучение с температурой 3 К (по абсолютной шкале Кельвина). Внеземное излучение было обнаружено с помощью радиотелескопов сначала на волне 7,35 *см*, а потом и на других волнах. Его максимум приходится на длину волны 1,5 *мм*. Это излучение было названо *реликтовым* в связи с его происхождением.

Существование космического теплового излучения удается объяснить только с помощью предположения о том, что Вселенная вблизи начала расширения была очень горячей. Спустя много лет после начала расширения вещество во Вселенной состояло, по-видимому, из электронов, протонов и ядер гелия. Кроме того, имелось электромагнитное излучение: радиоволны, свет и рентгеновские лучи, находящиеся в тепловом равновесии с частицами. При дальнейшем расширении вещество и излучение охлаждались подобно тому, как охлаждается газ в цилиндре, если объем его увеличивается. Спустя сотни тысяч лет температура упала до нескольких тысяч градусов. При этом электроны соединились с протонами, образовав атомы водорода. Плотность вещества уменьшилась настолько, что оно стало прозрачным для фотонов. В результате процесс излучения и поглощения фотонов практически прекратился. Излучение, по выражению В. Л. Гинзбурга, «отрывается» от вещества. В дальнейшем температура его падает и спустя время около $1{,}7 \times 10^{10}$ лет (предполагаемый возраст Вселенной) достигает 3 К. С точностью до одной тысячной нет различия в интенсивности реликтового излучения в зависимости от направления. Это означает, что расширение Вселенной с удивительной точностью на протяжении 99,9 % всего времени существования Вселенной происходило строго одинаково во все стороны.

Вот что, по-видимому, происходило на самой ранней стадии эволюции Вселенной. Спустя примерно время $\tau \approx 10^{-6}$ *сек* после начала расширения при температурах, превышающих 10^{12} К, среди барионов остаются только нуклоны: протоны и нейтроны. Они непрерывно превращаются друг в друга посредством сильных взаимодействий с участием π-мезонов и фотонов:

$$p + \pi^- \rightleftarrows n + \gamma, \qquad n + \pi^+ \rightleftarrows p + \gamma.$$

При температурах ниже 10^{11} К количество π-мезонов резко сокращается из-за нехватки энергии для их рождения. Взаимные превращения нуклонов начинают происходить по следующей схеме:

$$n + e^+ \rightleftarrows p + \bar{\nu}_e, \qquad n + \nu_e \rightleftarrows p + e^-, \qquad n \rightleftarrows p + e^- + \bar{\nu}_e,$$

т. е. за счет слабых взаимодействий при участии нейтрино, электронов и позитронов.

Когда температура падает ниже 10^{10} K (спустя время $\tau \approx 1$ *сек* после начала расширения), начинает резко уменьшаться концентрация электрон-позитронных пар и термодинамическое равновесие между протонами и нейтронами нарушается. Пока не становится существенным распад нейтронов, соотношение между числом протонов и нейтронов остается неизменным. При $\tau \approx 10$ *сек* во Вселенной имеется около 83 % протонов и 17 % нейтронов. Но пока температура не станет меньше 10^9 K, столкновения протонов и нейтронов не приводят к образованию дейтонов, так как фотоны высокой энергии их разрушают. Спустя $\tau \approx 100$ *сек* температура падает ниже 10^9 K и начинается образование дейтонов. При столкновении дейтонов друг с другом образуется гелий. Этот процесс продолжается до тех пор, пока все нейтроны не войдут в состав ядер гелия. Его концентрация, как показывают расчеты, должна составлять 30 % от всей массы вещества Вселенной. Эта цифра находится в хорошем согласии с известной из наблюдений концентрацией гелия в настоящее время.

Отсутствие в природе стабильных ядер с атомными весами 5 и 8 препятствует образованию в рамках модели горячей Вселенной более тяжелых, чем гелий, ядер. Общее число таких ядер составляет всего лишь около 0,1 % от всех ядер (преимущественно водорода и гелия) Вселенной. Синтез тяжелых элементов, по современным представлениям, происходил на гораздо более поздних этапах эволюции Вселенной в недрах образовавшихся звезд и при взрывных процессах типа вспышек новых и сверхновых звезд. В формировании этой картины видное место принадлежит советскому физику Я. Б. Зельдовичу.

Немногим более трех десятков лет назад в науке появилось слово «нейтрино» и было положено начало поразительной цепи открытий, которые мы связываем с тем, что именуется слабыми взаимодействиями.

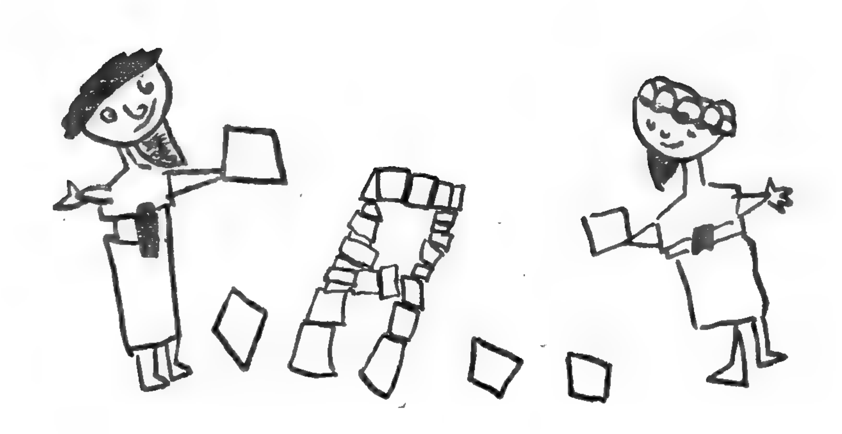
Наши сведения о мире обогатились, но в то же время сегодня мы яснее, чем вчера, чувствуем дыхание того «океана неизведанного», о котором говорил Ньютон еще триста лет назад.

Глава седьмая

«?»-СИЛЫ И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Три мудреца в одном тазу
Пустились по морю в грозу.
Будь попрочнее старый таз,
Длиннее был бы мой рассказ.

Детская английская песенка



1. *Что такое резонансные частицы?*
2. *Систематика элементарных частиц.*

I.

Элементарная частица . . . А что это такое?

Со времени Демокрита и до наших дней в тысячах книг склоняется слово «атом». «Атом» означает неделимый. Атомы отрицались, в атомах сомневались, в атомы поверили — и (в этом, согласитесь, есть своя доля курьезности,) поверив, очень скоро убедились, что они, в сущности, не оправдывают своего названия. Те атомы, о которых знает сегодня каждый школьник, имеют хорошо изученную структуру. Их можно расчленить.

Атомы делимы, и их деление стало решающим фактором всей нашей жизни. Они состоят из более мелких частиц. Может быть, на них, на эти частицы, следует перенести название «атом»? Так, в сущности, и было сделано, только изменилась терминология — частицы стали называть элементарными.

Элементарная частица... А что, собственно, это такое? В слове «элементарно», по замечанию Корбена и де Бенедетти, заключена восхитительная двусмысленность. Оно может означать или то, что понимается сразу, или же нечто настолько фундаментальное, что оно никем пока вообще не понято. Именно в последнем смысле сейчас и называют субатомные частицы элементарными.

Поначалу, впрочем, казалось все просто: это не допускающие дальнейшего дробления простейшие крупицы материи. Открытие каждой новой частицы составляло и составляет сейчас выдающийся триумф науки. Но уже лет тридцать назад к каждому очередному триумфу начала примешиваться доля беспокойства. Слишком уж часто случались эти триумфы. Число частиц перевалило за тридцать. Неужели все они элементарны? Среди них ведь встречаются и такие, как мюон, которые и по сей день кажутся непонятным капризом природы. Без них мир наш, казалось, мог бы спокойно обойтись.

Еще одно немаловажное обстоятельство. Ведь большинство частиц не вечно. Они рождаются, живут некоторое время, исчисляемое от нескольких минут для нейтрона до ничтожных долей секунды для

π^0-мезона и других частиц. Затем они гибнут, порождая новые частицы.

Все же после некоторых колебаний ученые сочли целесообразным считать все частицы элементарными и рассматривать их гибель не как распад на составные части, а как превращение одних в другие. Дело в том, что частицы-потомки, как уже подчеркивалось ранее, находятся совсем в ином отношении к частицам-предкам, чем осколки разбитого горшка к первоначально существовавшему целому сосуду.

Самые короткоживущие

Обстановка в физике элементарных частиц и без того была достаточно напряженной, когда произошло событие, обострившее ситуацию до крайности. Была открыта новая серия частиц со столь коротким временем жизни, что по сравнению с ними одна из самых короткоживущих частиц, π^0-мезон, может показаться бессмертной. Она в миллиард раз долговечнее.

Время жизни этих частиц (10^{-23} *сек*) таково, что они не оставляют никаких следов в камере Вильсона. Рождаются и почти сразу же гибнут, пролетев расстояния порядка размера протона (10^{-13} *см*).

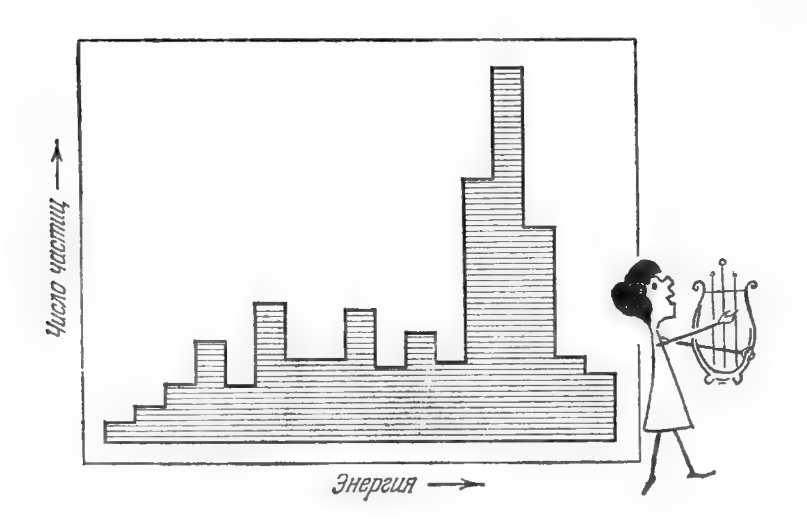
Сразу возник естественный вопрос: следует ли эти частицы причислить к уже известному списку элементарных частиц или же нет? С одной стороны, казалось бы, да! Как и обычные частицы, они характеризуются массой, зарядом, временем жизни, спином и т. д. Но... очень уж мало они живут. Можно только удивляться, как ученые вообще сумели обнаружить существование этих объектов. Тем не менее открытие было сделано, и сделано весьма убедительно.

Неуловимое, оказывается, также можно экспериментально обнаружить.

Название частиц: резонансы или резононы — говорит скорее не о природе этих частиц, а как раз о тех методах, с помощью которых они были обнаружены.

Как можно обнаружить неуловимое!

Первая группа резонансных частиц была открыта при изучении рассеяния π-мезонов на нуклонах (протонах и нейтронах). Облучая содержащую водород мишень пучком положительных π-мезонов, ученые обнаружили, что при кинетической энергии π-мезонов в 200 мил-



лионов электронвольт они рассеиваются особенно сильно. Наблюдается, как говорят физики, резонанс: число рассеянных мезонов резко возрастает при определенной энергии.

Образно говоря, можно предположить, что π-мезон и протон «сливаются» на некоторое время, превращаясь в новую частицу, которая затем опять распадается на π-мезон и протон. Из законов сохранения энергии и импульса легко определить массу этой частицы. Она оказалась равной 1236 миллионам электронвольт, если массу выражать, как это сейчас принято в физике элементарных частиц, в энергетических единицах.

Не предрешая вопроса об истинной природе промежуточного состояния (его обозначение Δ^{++}), физики осторожно назвали его резонансной частицей, чтобы подчеркнуть не вполне ясную природу этого образования.

Слово «резонанс», вероятно, вам знакомо. Камертон, на который падает звуковая волна, резонирует, т. е. сильнее всего раскачивается, когда частота звуковых колебаний совпадает с собственной частотой камертона. Такая картина типична для рассеяния волн любой природы.

Вспомним теперь, что в квантовой механике устанавливается простая и общая связь между частотой и энергией. Последняя отличается от частоты лишь на множитель h (постоянную Планка). Значит, на квантовом языке резонанс соответствует тому случаю, когда энергия рассеивающихся частиц (они же и волны согласно корпускулярно-волновому дуализму) совпадает с энергиями, «разрешенными» для рассеивателя. Эти «разрешенные» энергии несут очень важную информацию: они пропорциональны массам тех частиц — именно их и называют «резонансами»,— которые на короткие мгновения возникают на промежуточных этапах рассеяния.

По ширине резонансной кривой (т. е. графика, указывающего зависимость вероятности рассеяния от энергии налетающей частицы) можно оценить время жизни резонанса. Здесь на помощь приходит соотношение неопределенности Гейзенберга между энергией и временем. Ширина кривой дает порядок неопределенности энергии резонанса ΔE. Его время жизни

$$\Delta t \sim \frac{h}{\Delta E}.$$

Это время оказывается примерно равным 10^{-23} секунды. Двигаясь со скоростью, близкой к скорости света, мезон за это время пройдет расстояние 10^{-13} сантиметра, равное как раз размерам области взаимодействия мезона с протоном.

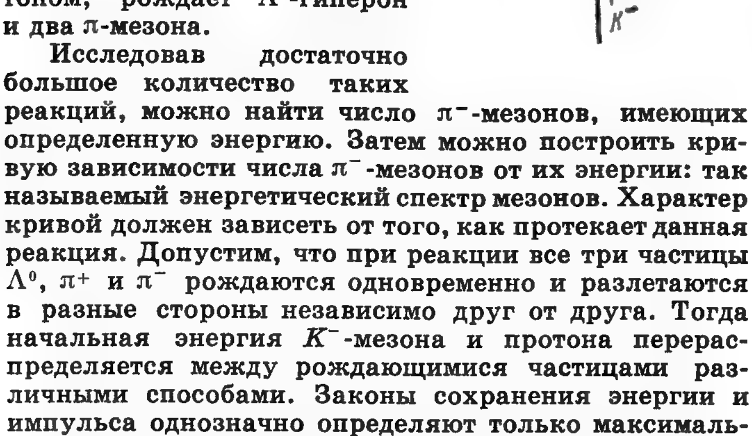
Где взять гиперонную мишень?

Когда были открыты резонансы, связанные с рассеянием π-мезонов на нуклонах, почти ни у кого из исследователей не было сомнения в том, что резонансы не являются особенностями только таких систем. И действительно, резонансы удалось обнаружить и в системах типа мезон — гиперон (барионные резонансы). Найдена была также группа мезонных резонансов ($\pi - \pi$, $\pi - K$, $K - K$ и т. д.). Однако в этих случаях их уже нельзя обнаружить, изучая рассеяние частиц друг на друге. Ведь невозможно создать мишень, например, из Λ^0-гиперонов. Гипероны распадаются за время порядка 10^{-10} секунды. Распадаются также и π-мезоны. Как можно уловить резонансы и в таких системах,

покажем на примере резонанса в системе π-мезон — Λ^0-гиперон.

Если бомбардировать протоны K-мезонами большой энергии, то часто наблюдается реакция, протекающая по следующей схеме:

$$K^- + p \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+ + \pi^-.$$



K-мезон, столкнувшись с протоном, рождает Λ^0-гиперон и два π-мезона.

Исследовав достаточно большое количество таких реакций, можно найти число π^--мезонов, имеющих определенную энергию. Затем можно построить кривую зависимости числа π^--мезонов от их энергии: так называемый энергетический спектр мезонов. Характер кривой должен зависеть от того, как протекает данная реакция. Допустим, что при реакции все три частицы Λ^0, π^+ и π^- рождаются одновременно и разлетаются в разные стороны независимо друг от друга. Тогда начальная энергия K^--мезона и протона перераспределяется между рождающимися частицами различными способами. Законы сохранения энергии и импульса однозначно определяют только максимально возможное значение энергии π^--мезона. Энергия способна принимать любые значения: от нуля до максимального.

Совсем иначе дело будет обстоять, если Λ^0-гиперон и π^+-мезон непосредственно после реакции ведут себя как единое целое. Тогда начальная энергия K^-- и p-частиц распределяется между двумя частицами и законы сохранения энергии и импульса однозначно определяют значение энергий обеих возникающих частиц. Несколько упрощенно говоря, законы сохранения энергии и импульса представляют собой в этом случае два уравнения с двумя неизвестными энергиями рожденных частиц, так как импульс может быть выражен через энергию. При рождении же сразу трех частиц неизвестных было бы три и энергии рожденных частиц однозначно бы не определялись. Экспери-

ментальная кривая имеет резкий выброс при определенной энергии π^--мезона. Значит, в большом числе случаев рождаются не все три частицы одновременно. Сначала рождаются две, а затем одна из них распадается:

$$K^- + p \longrightarrow \Sigma^{*+} + \pi^- \longrightarrow \Lambda^0 + \pi^+ + \pi^-.$$

Σ^{*+} — промежуточная система, которая ведет себя как единое целое. Так же, как и Δ^{++}, она называется резонансной частицей. Законы сохранения дают возможность найти ее массу: 1385 миллионов электронвольт. По ширине резонансного выброса можно определить время жизни резонанса Σ^{*+}. Оно оказывается таким же, как и у Δ^{++}.

Наряду с положительно заряженным резонансом Σ^{*+} есть еще отрицательно заряженный Σ^{*-} и нейтральный Σ^{*0}. Их массы примерно одинаковы.

Аналогичным способом были обнаружены другие резонансы. Общее их число превышает сейчас две сотни.

2.

Одна элементарная частица — «композиция» всех остальных

Открытие резонансов усложнило и без того не простую картину мира. Вопрос о том, что такое элементарная частица, приобрел еще бóльшую остроту. Ведь и так нельзя было с уверенностью утверждать, что все 35 частиц с относительно большими временами жизни (у некоторых оно бесконечно велико) являются элементарными. Слишком уж их много. Теперь к ним еще добавились резонансные частицы.

Но не только в этом дело. Сейчас становится бесспорным, что частицы, называемые по привычке элементарными, обладают в действительности крайне сложной структурой. Так, например, протоны и нейтроны окружены облаками пионов. Пионы структурно входят в нуклон. В свою очередь, π-мезоны могут превращаться в пару нуклон — антинуклон. Следова-

тельно, нельзя разложить частицы по ящичкам и изучать изолированно каждую из них. Раскрытие образа одной какой-нибудь частицы невозможно без учета других. Каждая элементарная частица начинает, по выражению Маркова, представляться «композицией» всех остальных. Получается замкнутый круг: свойства одной из частиц определяются всеми остальными. Размыкается где-либо этот круг, т. е. имеются ли простейшие частицы, из которых построены все остальные, или же в природе не существует частиц такого рода?

Пока это неизвестно. Никакого критерия элементарности частицы у нас нет.

Можно надеяться, что открытие резонансов лишь временно усложнило картину мира. В дальнейшем их исследование поможет решить проблему внутренней структуры элементарных частиц — проблему, являющуюся проблемой № 1 в современной физике.

Именно при исследовании вопроса о резонансах, пожалуй, наиболее ярко проявилась необходимость внести новое в те методы теоретического описания, которые применялись доныне.

Проблески единства

Уже сейчас открытие резонансов помогло увидеть то, что оставалось до сих пор скрытым от взоров исследователей. Представьте себе, что перед вами большое полотно, скрытое за плотной завесой. Вы хотите узнать, что за ним, но не в силах отбросить всю завесу сразу. Вот вам удалось прорвать ее в одном, другом месте и кое-где стали видны отдельные фигурки. Теперь нет сомнения, что перед вами картина со многими действующими лицами, а не просто грунтованный кусок холста.



Еще усилие—и целые участки картины обнажены. На некоторых из них можно усмотреть

глубокое родство между изображенными персонажами, единство композиции. Другие участки столь малы, что трудно понять, чем связаны их отдельные детали.

Гораздо труднее по случайным фрагментам догадаться, что общего между ними, уловить то целое, что изображено на картине, большая часть которой скрыта от вас.

Но вот постепенно завеса начинает спадать. Вы внимательно вглядываетесь в картину и обнаруживается удивительно цельный характер изображенного: отдельные фрагменты сливаются воедино. Больше того, вы можете даже догадаться, представить себе, что изображено на участках полотна, еще не доступных взору.

Картина не проста. Собственно, здесь целая серия картин, превосходящая числом классический триптих.

Приблизительно нечто подобное произошло в самое последнее время, когда творение Великого мастера — Природы — мир простейших частиц — предстало, после открытия резонансов, перед учеными в более обнаженном виде, чем когда-либо.

Близнецы в электрической одежде

Когда физики только начинали знакомиться с элементарными частицами, каждая из них казалась яркой и обособленной индивидуальностью. Но число известных частиц росло и они как-то почти сами собой начали разбиваться на группы, внутри каждой из которых обозначались признаки определенного родства.

Началась классификация частиц.

По каким же признакам можно проводить систематику?

Исторически первым признаком была масса. (Вероятно, здесь не последнюю роль сыграл поразительный пример менделеевской классификации элементов.) Частицы были разделены на группы — их так и называли тогда: легкие, средние и тяжелые. Однако эта схема потребовала уточнений. Пришлось учитывать спин и — что для нас особенно важно — характер взаимодействия. Так родились известные

классы частиц: лептоны, мезоны *), тяжелые частицы — барионы и, наконец, к ним добавились резонансы. С этой классификацией мы уже знакомились, разбирая таблицу элементарных частиц.

Но вот что любопытно. Если присмотреться повнимательнее к этой таблице, легко обнаружить среди мезонов и барионов группы частиц, которые прямо-таки напрашиваются на то, чтобы образовать из них четкие подгруппы.

Вот, например, три π-мезона: π^+, π^- и π^0. Если бы не заряды, то как можно было бы их различить? По отношению к сильным взаимодействиям все они ведут себя абсолютно одинаково. У них одинаковый спин. Даже небольшое различие в массах — и то имеет электромагнитное происхождение: исчезни электрические заряды — и массы стали бы одинаковыми. Как тут удержаться и не сказать, что три π-мезона — это, в сущности, не разные частицы, а одна, но только в различных зарядовых состояниях!

π-мезоны — не единственный известный нам пример близнецов, отличающихся лишь электрическими одеждами. Как, вероятно, помнит читатель, разговор о ядерных силах привел нас к такому же выводу относительно протона и нейтрона. Можно вообще сказать, что это не какой-то особый случай, а правило. Мимо него нельзя пройти, не насторожившись.

Познакомимся поближе с зарядовыми мультиплетами (так стали называть группы частиц, отличающихся только зарядовыми состояниями). Кроме триплета (мультиплета из трех частиц) π-мезонов существует еще триплет Σ-гиперонов. K-мезоны, как и протон с нейтроном, образуют зарядовый дублет (2 частицы); Λ^0-гиперон — синглет, т. е. единственный представитель особого зарядового мультиплета.

Близнецами в «электрической одежде» оказались и резонансы. Так, наряду с резонансом Δ^{++}, возникающим при рассеянии π^+-мезонов на протонах, имеются еще пион-нуклонные резонансы Δ^+, Δ^0,

*) Своей большой массой μ-мезон ввел ученых в заблуждение и был сначала причислен к мезонам. Теперь стало ясно, что по своей природе он — лептон.

Δ^-, различающиеся только электрическими зарядами. Эти заряды равны соответственно $2e$, e, 0 и $-e$.

Принадлежность к определенному зарядовому мультиплету и число частиц в этом мультиплете — это важнейшая отметка в паспорте элементарной частицы. Однако оказывается, что гораздо удобнее говорить не о числе частиц в мультиплете, а о так называемом изотопическом спине и о проекциях изотопического спина.

Что такое изотопический спин?

Самый термин «изотопический спин» представляет собой соединение понятий, каждое из которых порознь нам уже встречалось. Изотопами, как вы помните, называются элементы-близнецы, которые не различаются по своим химическим свойствам, но могут иметь несколько отличные физические «параметры» — массу, например.

В таблице Менделеева все изотопы стоят в одной клетке и все они имеют одно и то же наименование. Мы говорим, например, что гелий-три (He^3) и гелий-четыре (He^4) — это не разные элементы, а, если хотите, разные состояния одного и того же элемента. Подобно этому все частицы — члены одной семьи зарядового мультиплета — также рассматриваются как одна частица, но только находящаяся в различных состояниях.

Ну, а при чем здесь «спин»? Если иметь в виду тот спин, который можно определить как «собственный вращательный момент», то совершенно не при чем. И если одно и то же слово употребляется в совершенно разных смыслах, то здесь нет ничего ни нового, ни удивительного. Мало ли таких примеров? Сила ветра измеряется в баллах. В баллах же оцениваются знания учащихся. Слово «градус» вполне успешно «работает» и при рассказе о температуре, и для измерения углов. Те же углы можно измерять в минутах и секундах, являющихся в то же время мерой совсем другой величины — времени. Впрочем, этот последний пример заслуживает того, чтобы на нем остановиться. Часовая стрелка идет по циферблату. Если полный оборот — один час, то изменение угла за одну минуту (минуту времени!) точно равно одной «угловой» минуте. Здесь полный

параллелизм — он, конечно, связан с выбором той «механической модели», которую мы применяем для измерения времени (например, взяв песочные часы, мы бы ничего подобного не получили).

А теперь выберем другую «механическую модель» — частицу с определенным спином. Пусть этот спин равен, например, $^1/_2$ (все, напоминаем, в единицах $\hbar$). Такая частица, как вы помните, может иметь всего две ориентации — либо ее спин параллелен импульсу, либо антипараллелен. Две ориентации, два возможных состояния. А если спин равен нулю, то, разумеется, «как ни верти» частицу, ничто не изменится — значит, здесь всего одно состояние.

А спин, равный 1? Квантовый подсчет говорит, что здесь возможны три различных состояния. Если спин частицы $^3/_2$, то таких состояний четыре, и т. д. В общем случае спин, равный n, обеспечивает возможность $2n+1$ различных «внутренних», как их называют, состояний. А теперь вспомним о наших «семействах» частиц. Напомним, что «членов каждого из этих семейств» мы рассматриваем опять как одну частицу, но в различных «внутренних» состояниях. И число таких состояний от «семейства» к «семейству» меняется. У самых бедных (Λ^0-гиперон) — всего одно. (Как не вспомнить о нулевом спине!) У других (нуклоны) их два. Опять полная аналогия со случаем спина ½. У π-мезонов (π^+, π^0 и π^-) три, как для спина, равного единице, и т. д. Теперь вы видите, что наша «механическая модель» вполне себя оправдывает, а, стало быть, есть все основания говорить об изотопическом спине.

Но мы можем сделать и еще один шаг: вспомним, что, в то время как значение спина (мы опять говорим о «механическом спине») показывает число возможных внутренних состояний, конкретное задание каждого из этих состояний можно производить, например, указывая, как направлен спин (по отношению к импульсу или вообще любой оси; по традиции обычно выбирают ось z); то же самое можно выразить и в такой форме: состояние определяется проекцией спина на ось z. Ничто не мешает нам поступать аналогично и в случае изотопического спина — припи-

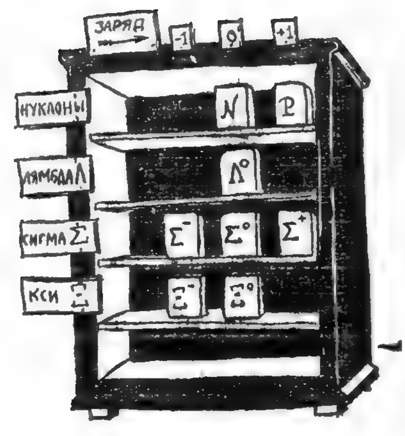
Частица	Число частиц в мультиплете	Изотопический спин	Заряд частицы	Проекция изотопического спина
Λ^0	0	0	0	0
p n	2	$^1/_2$	$+e$ 0	$+^1/_2$ $-^1/_2$
π^+ π^0 π^-	3	1	$+e$ 0 $-e$	$+1$ 0 -1
K^+ K^0	2	$^1/_2$	$+e$ 0	$+^1/_2$ $-^1/_2$
Σ^+ Σ^0 Σ^-	3	1	$+e$ 0 $-e$	$+1$ 0 -1
Δ^{++} Δ^+ Δ^0 Δ^-	4	$^3/_2$	$+2e$ $+e$ 0 $-e$	$+^3/_2$ $+^1/_2$ $-^1/_2$ $-^3/_2$

сывать каждому из членов наших «изоспиновых семейств» определенное значение «проекции изотопического спина на ось z». Конечно, можно было бы и просто указывать заряд. Ведь из предыдущего явствует, что эта проекция как раз и определяет заряд частицы семейства, но, оказывается, именно проекция изотопического спина является наиболее удобной величиной для математического аппарата теории.

Дело, однако, не только и не столько в удобстве. Изотопический спин обладает одним необычайно важным свойством, которое само по себе выдвигает его на почетное место: при сильных взаимодействиях изоспин сохраняется. Это значит, что при любых превращениях, обусловленных сильными взаимодействиями, суммарное значение изоспина всех частиц до превращения такое же, как у частиц, образовавшихся после превращения. Так, в реакции

$$p+\pi^- \longrightarrow n+\pi^0$$

изотопический спин начальных частиц равен $^3/_2$ ($^1/_2$ у протона и 1 у π^--мезона). Частицы в конечном состоянии имеют суммарный изоспин, равный также $^3/_2$ ($^1/_2$ у n и 1 у π^0-мезона).



Закон сохранения изотопического спина при сильных взаимодействиях является концентрированным выражением независимости сильных взаимодействий от электрического заряда. Это единственный закон сохранения, выполняющийся только при сильных взаимодействиях.

В таблице на предыдущей странице приведено несколько примеров соответствия между числом частиц в зарядовом мультиплете и зарядами частиц, с одной стороны, и изотопическим спином наряду с его проекциями, с другой.

Впрочем, показ всегда нагляднее, чем рассказ. Представим себе, что мы производим систематику частиц, барионов например, т. е. раскладываем их по полочкам не в переносном, а в самом буквальном смысле этого слова. Мы даже нарисуем эти полочки, для каждого зарядового мультиплета по одной, и отведем места для частиц в строгом соответствии с их зарядами.

Теперь, когда частицы разложены по полочкам, можно полюбоваться делом своих рук. Но вот что странно, — расположение оказалось каким-то несимметричным. Эту асимметрию можно описать количественно; достаточно определить средний заряд на каждой полочке. Для нуклонов — они самые старые наши знакомые из семьи барионов — этот средний заряд мультиплета равен $+^1/_2$. С этим значением мы и будем сравнивать средние заряды всех остальных барионных мультиплетов (чтобы получались целые, а не дробные значения, удобно брать удвоенную разность средних зарядов мультиплетов). Вот,

например, Ξ-частицы. Средний заряд равен — ½. Удвоенная разность этого и нуклонного среднего заряда равна — 2. Для Σ-триплета получаем тем же способом значение — 1, как и для Λ^0. Нетрудно проделать аналогичные подсчеты и для мезонов, приняв за «эталон» (т. е. считая для них смещение равным нулю) π-мезоны. Не напоминают ли вам что-либо получившиеся цифры? Ну, конечно, это же значения странностей, которые играли такую важную роль в рассказе о слабых взаимодействиях.

Очень любопытно! С новой точки зрения, интересуясь систематикой частиц (мы ведь не думаем сейчас ни о каких распадах или иных взаимных превращениях), мы опять пришли к необходимости ввести в рассмотрение странность.

Кирпичики в кирпичиках

Поставив перед собой задачу — навести порядок среди становящейся все более обширной коллекции частиц (даже заведя с этой целью шкафы), мы выделили среди других четыре признака: спин, массу, заряд и странность. Спин определяет, в какой из шкафов — барионный или мезонный следует помещать частицу (лептоны мы рассматривать не будем), а остальные величины указывают номер соответствующей полки и место на ней.

Все чинно и аккуратно, порядок наведен, систематика есть! Но какой от нее прок? Имеет ли она хоть какой-либо физический смысл? Правильно ли выбраны признаки, по которым произведена классификация? Представьте себе, что мы занимались бы не классификацией частиц, а систематикой в биологии и взяли бы за основу, скажем, вес животного. Могло бы оказаться, что ближайшими родственниками человека, к примеру, являются крокодил и свинья. Дело, конечно, не в том, насколько это лестно для нас, людей,— такая систематика просто не способствует углублению понимания животного мира. Итак, хороша ли наша классификация элементарных частиц?

Прежде всего отметим, что все выбранные нами признаки — это величины, не меняющиеся при сильных взаимодействиях. При любых превращениях, вызванных этими взаимодействиями, электрический

заряд исходных «продуктов» и тех, которые образуются в конечном состоянии, одинаков. То же можно сказать о странности и о спине. (Анализ положения с массой сложнее, и мы здесь этого касаться не будем.)

Может сложиться такое впечатление, что есть какой-то набор материальных носителей заряда, странности и спина, какие-то субчастицы, которые, склеиваясь в определенных комбинациях, формируют барионы и мезоны, причем во всех превращениях сами эти субчастицы не исчезают и не возникают, а только переходят из одних комбинаций в другие. Если поверить в это, то сохранение заряда или странности выглядит не более удивительным, чем сохранение числа деталей в детском конструкторе, независимо от того, сделан ли из этих деталей паровоз или мельница.

Элементарные частицы уже давно поэтически называют кирпичиками материи. Но если существуют субчастицы, то, стало быть, эти кирпичики состоят из других кирпичиков, «еще более элементарных»? Эта идея столь соблазнительна, что нельзя отказать себе в удовольствии поговорить о ней подробнее.

Кварки!

Прежде всего заметим, что у наших субчастиц должен быть спин, равный ½. Действительно, из половинок можно составить как целые, так и полуцелые спины, чего мы не могли бы сделать, будь в нашем распоряжении только «детали» со спином, равным нулю, единице или любому целому числу.

Ну, а заряд, масса, странность?

Вот здесь нас подстерегает сюрприз. Оказалось, что наиболее цельная картина получается, если, отказавшись от прочно укоренившейся привычки, приписать нашим кирпичикам в кирпичиках не целочисленные (т. е. кратные электронному), а дробные заряды.

Дробные заряды! Еще недавно такая идея показалась бы бредовой. Однако именно три такие частицы ввел в рассмотрение Гелл-Манн. Он же дал им название «кварки».

Оказывается, виноват... Финнеган, герой романа английского писателя Джойса... Финнегану — или

его двойнику, «вытеснившему его из жизни», мерещится, что он король Марк из средневековой легенды, у которого племянник Тристан похитил жену Изольду. Король Марк гонится за Изольдой на корабле, над ним кружатся чайки (которые, впрочем, может вовсе не чайки, а судьи) и злобно кричат: «Три кварка мистеру Марку», и все громче их загадочный, страшный крик: «Три кварка, три кварка, три кварка». Короче говоря, термин «кварки» «в переводе» на нормальный человеческий язык должен обозначать нечто вроде «бредовые», «немыслимые», «кошмарные», «дикие» — можете смело продолжить список синонимов.

Сколько же нужно вывести кварков? Разумеется, хотелось бы как можно меньше. Оказывается, необходимый минимум — три кварка. В литературе они часто обозначаются малыми буквами p, n и λ (не путать с символами протона, нейтрона и лямбда-частицы, которые в дальнейшем обозначаются P, N и Λ).

Спины всех кварков будем, как уже договорились, считать равными ½, а остальные свойства удобно представлять в виде такой таблицы:

Символ кварка	Электрический заряд	Странность	Барионный заряд
p	$+^2/_3$	0	$^1/_3$
n	$-^1/_3$	0	$^1/_3$
λ	$-^1/_3$	-1	$^1/_3$

Попробуем теперь комбинировать кварки таким образом, чтобы получать известные нам частицы. Начнем, скажем, с протона P. Странность протона равна 0, следовательно, мы должны ограничиваться набором из p и n. Всего в P должны входить три кварка, чтобы общее барионное число получилось равным единице. Если учесть к тому же, что заряд P равен $+1$, то мы приходим к единственному набору: ppn. Впрочем, нет, не единственному. Мы забыли о спине. Необходимо позаботиться о том, чтобы суммарный спин был равен ½. Этого можно добиться, если принять, что спины двух p-кварков параллель-

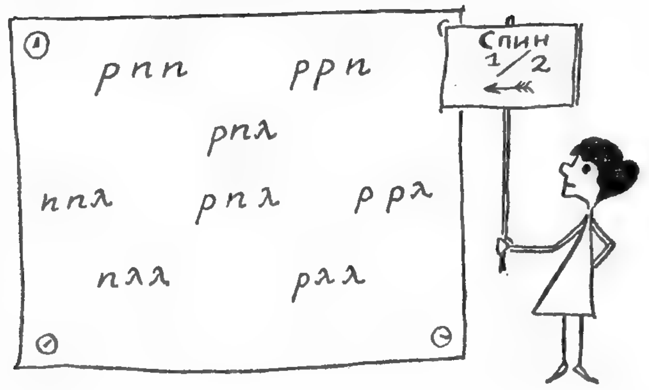
ны, а спин n антипараллелен им (или «оси Z», как говорят физики, т. е. какому-то выбранному направлению в пространстве).

Символически это можно записать так:

$$P = p\uparrow p\uparrow n\downarrow.$$

Стрелка справа от символа обозначает направление его спина. Рецепт образования частиц из кварков, вероятно, прояснился на этом примере и не производит впечатления сложного. Давайте же попробуем комбинировать тройки кварков и посмотрим, что из этого получится.

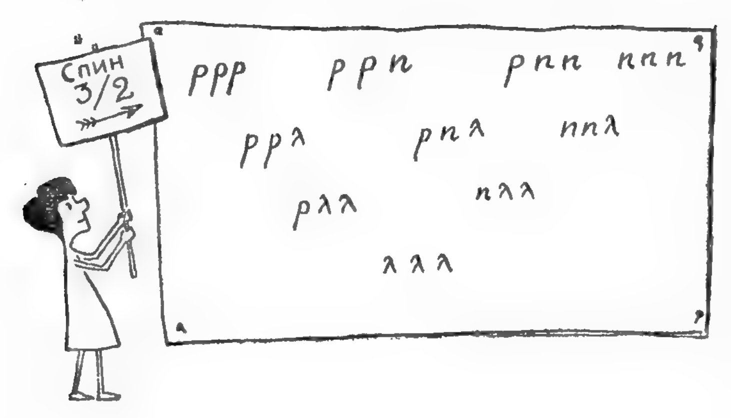
Сначала договоримся рассматривать такие комбинации, спин которых равен ½. Это значит, что спины всех кварков не могут быть направлены одинаково. Более тонкий анализ, опирающийся на принцип Паули, о котором мы уже раньше говорили в этой книге, показывает, что не все комбинации спинов являются «разрешенными». Например, если общий спин равен ½, то нужно исключить из рассмотрения комбинации из трех одинаковых кварков. Есть и ряд других тонких моментов, в обсуждение которых мы входить не будем. Давайте просто выпишем все «разрешенные» комбинации, располагая их рядами. Пусть внутри каждого ряда электрический заряд возрастает слева направо, а странность остается одной и той же в каждом ряду и уменьшается на единицу при переходе от одного ряда к другому под ним. Мы получим такую таблицу:



Попробуем теперь сопоставить этим тройкам частицы. Комбинация *ppn* нам уже знакома — это протон. Легко видеть, что нейтрону соответствует *pnn*. Значит, первая строчка — это нуклонный дублет. Зарядовый синглет *pnλ* можно сопоставить Λ^0-частице; третья строчка дает триплет Σ^-, Σ^0, Σ^+ и, наконец в последней строке расположились комбинации кварков, которые по значению странности и электрическим зарядам соответствуют Ξ-дублету*).

Получается — и хорошо получается! Мы уже построили так называемый барионный октет — сверх- или супермультиплет, объединяющий все барионы в одну группу.

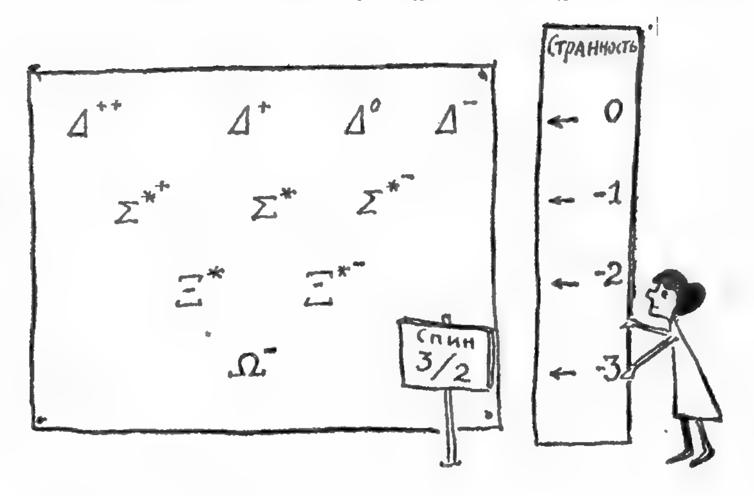
Давайте продолжим наше увлекательное комбинирование — нечто вроде варианта детских кубиков. Переберем теперь тройки кварков с общим спином $^3/_2$. И опять, придерживаясь тех же правил, что и в предыдущем случае, построим таблицу:



*) То, что у нас получились две (различные!) комбинации *pnλ*, связано с возможностью различных ориентаций спинов в этой тройке. Принцип Паули запрещает двум частицам одного сорта находиться в одинаковых состояниях. Однако в данном случае все кварки различны; значит, принцип Паули не вносит никаких запретов.

Выберем за направление «оси *Z*» направление *p*. Это даст нам возможность около первого, скажем, символа в нашей тройке писать стрелку, направленную вверх: $p\uparrow$. Остается перебрать все возможные комбинации, дающие общий спин $^1/_2$. Совершенно ясно, что таких комбинаций всего две: $p\uparrow n\uparrow \lambda\downarrow$ и $p\uparrow n\downarrow \lambda\uparrow$. Это и поясняет, почему в нашей таблице *pnλ* появилось два раза.

Первое впечатление от этой таблицы такое, что мы понастроили частиц, которых и в природе-то нет. Например, что это за частица *ppp*? Ее электрический заряд должен быть равен $+2$, а ни у протона, ни у Σ, ни у Ξ заряд не превосходит единицы. А резонансы? Мы забыли о резонансах,— а ведь их тоже нужно включать в общую схему классификации. Среди резонансов есть нужная частица — это известный первенец семейства резонансов: Δ^{++}. Нашлось место для него в нашей систематике. Найдется место и для других резонансов. Без лишних слов выпишем соответствующую таблицу:



Предсказанная встреча

В этой таблице все уже довольно хорошо нам знакомо. Звездочки показывают, что мы имеем дело с резонансами, являющимис возбужденными состояниями частиц с соответствующими символами; стоящие около этой звездочки крестики или черточки опр(деляют электрический заряд. Однако есть в таблице и нечто новое: символ Ω^-. Раньше мы с ним не встречались. Что это такое? Не только мы не встречались раньше с такой частицей. Лишь энтузиасты-теоретики, твердо уверовавшие в новую систематику, говорили: должна быть такая частица, ее нужно искать. Они даже

подробно описывали эту частицу: у нее должен быть заряд —1, странность —3, барионное число +1, спин, равный $^3/_2$. Более того, даже масса была предсказана теоретически. Как? Очень просто (задним числом все всегда очень просто).

Если, заглянув в таблицу резонансов, выписать оттуда массы, то нетрудно заметить, что у нас в таблице эти массы оказываются тем больше, чем ниже ряд. В то же время переход к каждому следующему ряду снизу сопровождается добавлением одного λ-кварка. В верхнем ряду λ нет, в следующем — одно λ, ниже — два и, наконец, Ω^- состоит из трех λ-кварков. Сопоставив рост массы с ростом числа кварков, нетрудно сделать напрашивающийся вывод, что *p*- и *n*-кварки (им мы припишем одинаковые массы) легче, чем λ-кварк. Можно даже прикинуть, насколько. Достаточно сравнить массы резонансов в соседних рядах. Разница получается примерно в 0,16 массы нуклона (или в принятых теперь энергетических единицах 146 *Мэв*). Таким образом, Ω^- должна иметь массу на 146 *Мэв* большую, чем Ξ^*. Смотрим опять в таблицу. Масса Ξ^* равна 1530 *Мэв*. Следовательно, Ω^- должна иметь массу 1676 *Мэв*. Так предсказывали теоретики.

И вот 31 января 1964 года такая частица была экспериментально найдена! В Брукхейвенской лаборатории в США проводилось исследование столкновений K^--частиц с протонами. Ω^--частица была обнаружена в реакции:

$$K^- + P \rightarrow \Omega^- + K^+ + K^0.$$

Спустя примерно 10^{-8} секунд после своего рождения Ω^- распадается по схеме: $\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \pi^-$. Относительно большое время жизни связано с тем, что распад по «сильным каналам», т. е. обусловленный сильными взаимодействиями, запрещен сохранением странности; изменение же странности, как мы говорили, возможно лишь при распадах за счет слабого взаимодействия.

Открытие Ω^--частицы, поразительная точность, с которой подтвердились предсказания теории, не могли, конечно, не произвести сильнейшего впечатления. Если до этого систематика нередко рассмат-

ривалась как красивая, остроумная, но далекая от убедительности игра фантазии, то с обнаружением Ω^- настроения физиков резко изменились. В воздухе явственно запахло большими событиями.

Множатся успехи...

Новая классификация приносила один успех за другим. Естественно и непринужденно вписались в общую систему мезоны и бозонные резонансы. Бозоны — частицы с целым спином. Следовательно, их нужно склеивать из четного числа кварков. Точнее, из равного числа кварков и антикварков*) — ведь мы сейчас хотим получать частицы с барионным зарядом, равным нулю. (У всех антикварков барионный заряд, как и остальные квантовые числа, противоположен по знаку заряду соответствующих кварков.)

Наиболее простые комбинации такого сорта имеют вид: $p\bar{p}$, $n\bar{n}$, $\lambda\bar{\lambda}$, $p\bar{n}$, $\bar{p}\lambda$ и т. д. Если спины направлены антипараллельно, то получаются частицы нулевого спина. Например, π^+-мезон следует рассматривать как комбинацию $p\!\uparrow\!\bar{n}\!\downarrow$. Действительно, заряд получается равным

$$\frac{2}{3}+\frac{1}{3}=1,$$

странность равна нулю, как то и нужно для π^+-мезона. Хотите построить странный мезон, например K^+? Значит, нужно взять комбинацию $p\bar{\lambda}$. Электрический заряд такой комбинации равен единице, плюс единице равна и странность. Чтобы получать бозоны целого спина, нужно подбирать пары кварков — антикварков с одинаково направленными спинами.

Пожалуй, не стоит выписывать всего этого подробно. Читатель, мы надеемся, поверит нам, что мезоны и бозонные резонансы, образуя свои супермультиплеты, так же аккуратно укладываются в рамки систематики, как и барионы.

Однако и этим не исчерпывается успех теории. Предположив, что кварки обладают магнитными моментами, пропорциональными их зарядам, можно найти соотношение между магнитными моментами

*) Антикварки обозначаются символами с чертой над ними.

составляемых из этих кварков частиц — например, найти отношение магнитных моментов протона и нейтрона. Оно получается равным $\frac{3}{2}$. А опыт дает значение 1,46. Опять-таки нельзя не признать, что совпадение блестящее.

...И яснее вырисовываются трудности

В тот самый момент, когда наш рассказ о кварках, казалось, достиг апогея, когда читатель, возможно, уже почувствовал к ним доверие и симпатию, вдруг появилось, да еще выделенное шрифтом, слово «трудности». Такой поразительный успех, даже, можно сказать, триумф, такое блестящее предсказание новой частицы — даже если не говорить об упорядочении частиц уже известных,— такое изящное объяснение свойств этих частиц, например соотношения между их магнитными моментами,— и вдруг «трудности»!

Какие? В чем?

Когда Гелл-Манна спросили, существуют ли кварки (напомним, что он в значительной мере и ввел их в науку), ответ гласил: «Кто знает?...»

Действительно, этого мы пока не знаем. Может быть, нечто рациональное, что бесспорно содержится в систематике частиц, мы напрасно поспешили истолковать в духе наглядных моделей «кирпичиков в кирпичиках»?

Сторонники кварков ищут подтверждения своих взглядов даже в исторических параллелях. Они ссылаются, например, на молекулярную теорию, которая была сформулирована до того, как появились прямые доказательства существования молекул. Тогда можно было бы говорить, что явления протекают так, «как если бы существовали молекулы». Но ведь теперь мы знаем, что молекулы действительно существуют.

Правда, на эту параллель можно ответить другими, не менее поучительными. Максвелл строил электродинамику, исходя из представлений о светоносном эфире,— но теперь мы знаем, что такого эфира нет. Фурье вывел используемые и сегодня уравнения теплопроводности, считая, что носителем тепла является некая всепроникающая жидкость,—

но ведь сейчас мало кто вспоминает о теплороде, разве что историки естествознания.

Исторические параллели — штука деликатная.

Однако зачем,— спросите вы,— прибегать к каким-то туманным и неубедительным аргументам вместо того, чтобы просто обратиться к опыту? Нельзя ли попытаться экспериментально обнаружить кварки? Тем более, что кварки ввиду дробности их заряда должны быть в свободном состоянии устойчивыми и заметно выделяющимися на фоне других частиц.

Поиски кварков велись много лет. Проще всего, казалось бы, не искать, а создавать их, осуществляя столкновения разогнанных на ускорителях частиц. Что может быть проще: ведь если все частицы состоят из кварков, то достаточно взять любую из этих частиц, стукнуть по ней чем-нибудь посильнее — и осколки-кварки так и брызнут во все стороны.

По идее, конечно, просто. Но никому никогда еще это не удавалось проделать. Возможно у нас нет пока достаточно мощных ускорителей.

Но такие ускорители есть у природы. Среди космических частиц, прилетающих к границам земной атмосферы, хотя и не очень часто, но появляются частицы с поистине космическими энергиями. Столкнувшись с ядрами атомов, входящих в состав атмосферы, такие частицы-силачи должны были бы породить свободные кварки. Остается только эти кварки разыскать, что должно значительно упрощаться дробностью их заряда.

Итак, программа действий и ясна и проста. Тем больше обескураживает полный ее неуспех. Никто и нигде пока кварков не нашел.

Аромат и цвет кварков

Казалось бы, у физиков должны опуститься руки... Ничуть не бывало! Энтузиазм тех, кто верил в кварки, не уменьшился. Более того, вместо трех кварков они начали рассматривать двенадцать, а иные — и того более. И даже в затруднениях кварковой модели (явно обескураживающих) теоретики усмотрели указание на то, какие можно наметить пути дальнейших поисков.

Однако попробуем рассказать по порядку.

Прежде всего, почему мало трех кварков?

Это довольно простой вопрос. По-видимому, внимательные читатели уже подметили, что, перебирая различные наборы из кварков и «комбинируя» таким образом различные частицы, мы как будто забыли о принципе Паули. Действительно, в протоне, например, у нас оказалось два p-кварка с одинаковыми направлениями спина, хотя эти кварки являются фермионами и, значит, их состояния в системе должны чем-то различаться. И это не единственная «вольность», допущенная нами; более того, эта «вольность» вынужденная. Пытаясь «построить» хотя бы ту же Ω^--частицу из трех λ-кварков, мы просто не можем избежать совпадения спинов хотя бы пары из них.

Может быть, отказаться от принципа Паули? Нет, на это решиться трудно, ведь еще ничто и никогда не давало нам повода усомниться в нем.

К тому же, есть гораздо более простой и естественный путь. Очевидно, чтобы избежать указанных трудностей, достаточно «пометить» кварки. Иначе говоря, у кварков должно быть какое-то дополнительное внутреннее квантовое число, по которому, во всем остальном одинаковые, они и будут различаться.

Когда такое квантовое число было введено, его назвали «цветом», что очень образно, хотя, конечно, никакого отношения к настоящему цвету не имеет. Все три кварка было предложено рассматривать в трех «цветовых вариантах», скажем «синем», «красном» и «желтом». И более того, к прежним трем (а при учете цвета — девяти) был добавлен еще один кварк, также трех возможных цветов. Таким образом, число кварков оказалось равным $4 \times 3 = 12$.

Иногда, вместо того чтобы пользоваться уже знакомой нам терминологией, предпочитают говорить не о четырех кварках, трех цветов каждый, а о «четырех ароматах и трех цветах» кварка. Однако дело, конечно, не в терминологии, а в том, почему понадобилось вводить эти четыре аромата и три цвета, и не чересчур ли много получается опять «фундаментальных частиц» в теории.

Последнее опасение тем более обоснованно, что из двенадцати кварков (и такого же числа антиквар-

ков) можно «скомбинировать» неимоверное число «частиц», даже если считать только комбинации по три (для барионов) и по два (для мезонов), что тоже еще требует оправдания. Многие из таких комбинаций явно не имеют никакого отношения к эксперименту, т. е. оказываются «лишними». Чтобы исправить положение, вводится дополнительное требование, которое хочется назвать «принципом бесцветности». По этому принципу все наблюдаемые частицы должны быть «белыми», или, что равносильно, «бесцветными». Это может быть достигнуто либо когда равноправно представлены все цвета для каждого из ароматов, либо когда около каждого цветного кварка присутствует антикварк того же цвета и аромата.

Такое ограничение резко уменьшает число возможностей, но их остается все же еще весьма много. К тому же, не вполне ясно, какие из этих возможностей более предпочтительны. Так, например, какой (или какие) набор кварков образует протон? Прежде мы отвечали: два p-кварка и один n-кварк. Теперь же все кварки — трехцветные. Хотя мы и знаем, что «принцип бесцветности» предписывает всем трем кваркам иметь разные цвета, но какие именно — это пока нам неизвестно.

Однако, как оказывается, этого уточнять и не нужно. Дело в том, что кварки должны не только «присутствовать» в частицах, но и чем-то объединяться. Как мы уже говорили раньше, такое объединение в квантовой теории появляется в результате обмена квантами некоторого поля, переносчиками взаимодействия. В наиболее популярных теперь теоретических построениях роль таких переносчиков играют так называемые «глюоны» — группа частиц со спином, равным $\hbar$, и нулевой массой покоя. Испускание и поглощение глюона кварком не меняет аромата последнего, но изменяет его цвет. Можно наглядно представлять себе дело таким образом, что беспрестанный обмен глюонами заставляет каждый кварк меняться в цвете, так что в результате система в целом все время остается бесцветной, но ни один из вариантов распределения цветов между кварками не оказывается выделенным. Цвет кварк-антикварковой пары, образующей любой из мезонов (какой имен-

но — зависит от аромата кварков), можно также не фиксировать по той же причине. Это значительно упрощает анализ всех возможных комбинаций.

Нетрудно догадаться, что набор глюонов, который бы мог обеспечить перенос всех цветов между всеми типами кварков, должен быть достаточно богатым. Однако значительно труднее подойти к пониманию тех выводов из наиболее увлекательных вариантов теории глюонного обмена, которые касаются энергии взаимодействия кварков.

Эта энергия, как и в «обычных» теориях, встречавшихся нам раньше, зависит от расстояния между взаимодействующими частицами. Но уж очень неожиданной получается эта зависимость. Мы привыкли, что по мере увеличения расстояния взаимодействие уменьшается. В теории же кварков, по-видимому, можно указать такой вариант, в котором взаимодействие между ними неуклонно возрастает по мере увеличения расстояния.

При таком положении вещей многое получает новую и очень любопытную окраску. Кварки, компактно расположенные внутри областей типичных «барионных» и «мезонных» размеров, должны вести себя почти как свободные. Это, кстати, должно проявляться в опытах по рассеянию частиц очень высоких энергий, например электронов, хотя бы на тех же протонах или нейтронах. При таком рассеянии кварки должны «чувствоваться» электронами как некоторые независимые точечные частицы, заполняющие «интерьер» нуклонов. Такие точечные свободные «субчастицы», для которых даже было придумано название — партоны, — хотя и не очень уверенно, но вроде бы все же начинают нащупываться в экспериментах.

Но важнее и интереснее другое: находит естественное объяснение тот факт, что, несмотря на тщательнейшие поиски (искали даже в грунте Луны), свободных кварков никто найти не смог.

Действительно, при указанном возрастающем потенциале кварк просто не может вырваться из плена взаимодействий и стать свободным. Даже если пытаться «вытянуть» его из недр частицы, то, какую бы значительную энергию мы ни затратили, она в конечном итоге пойдет на порождение кварк-антикавар-

ковых пар, которые мы зарегистрируем как мезоны, но освободить единичный кварк так и не удастся.

Здесь весьма кстати отметить, что порожденные мезоны (а их рождение может происходить виртуально и без внешнего воздействия) могут и должны выступать как «переносчики второго поколения» взаимодействий между нуклонами и другими барионами. В этом смысле обсуждавшиеся нами ранее сильные взаимодействия сводятся к некоторым более фундаментальным «первичным» межкварковым взаимодействиям.

По выражению Ш. Глешоу — одного из теоретиков, активно работающих в области «хромодинамики», как часто называют теорию цветных кварков,— «...взаимодействия бесцветных адронов *) — не более чем слабый остаток от основного взаимодействия цветных кварков. Точно так же, как ван-дер-ваальсовы силы между молекулами — только слабый след электромагнитных сил, которые притягивают электроны к ядру, сильные силы, действующие между адронами,— лишь слабый след сил, действующих внутри отдельного адрона».

Нетрудно догадаться, что «хромодинамика» затрагивает не только сильные, но и слабые взаимодействия. Здесь опять придется вспомнить о модели Вайнберга и Салама, но только учесть, что за слабые взаимодействия адронов ответственны составляющие их кварки, которые и обмениваются векторными бозонами. Здесь, однако, есть нечто принципиально новое: если обмен глюонами изменял только цвет кварков, но не затрагивал их аромата, то испускание и поглощение тяжелых векторных бозонов, наоборот, меняет только аромат, т. е. вызывает превращение кварков одного типа в другие.

Очарованный кварк

И здесь уместнее всего вернуться к разговору о четвертом кварке. Несколько причин заставляют теоретиков говорить о его необходимости. Одна из них выглядит довольно формально, по крайней мере, на первый взгляд. Хорошо известно, что четыре лептона разбиваются на две довольно изо-

*) То есть сильно взаимодействующих частиц.

лированные группы: в одну входят электрон и электронное нейтрино, а в другую — мюон и мюонное нейтрино. Внутри каждой группы одна частица может превращаться в другую при испускании (или поглощении) заряженного векторного бозона. Подобное же разбиение желательно и для кварков. Однако его можно достигнуть, только введя в рассмотрение еще один, четвертый кварк (конечно, в трех цветовых модификациях).

Этот новый, четвертый кварк называют «очарованным» и обозначают буквой *c* (от английского «charm» — очарование; иногда четвертый кварк называют «чармированным», не прибегая к переводу).

Как и всегда, введение нового кварка отражает введение нового квантового числа — его и называют «очарованием». Четыре типа (аромата) кварков можно сравнить с помощью новой небольшой таблицы:

Обозначение	Масса, *Гэв*	Электрический заряд	Странность	Очарование
p	0,336	$+^2/_3$	0	0
n	0,338	$-^1/_3$	0	0
λ	0,540	$-^1/_3$	−1	0
c	1,5	$+^2/_3$	0	+1

Подобно тому как странность была введена, чтобы объяснить «заторможенность» некоторых (частично обсуждавшихся выше) процессов, очарование также должно служить, в конечном итоге, объяснению аналогичных экспериментальных фактов. И, пожалуй, самым интересным из таких данных является открытие в ноябре 1974 г., независимо в Брукхейвене и в Стенфорде, новой частицы. Эта частица, которую обозначают *j* или ψ, является мезоном, имеет массу около 3,1 *Гэв* (более чем втрое превосходящую протонную) и «живет» порядка 10^{-20} секунды, что в тысячу раз превосходит «полагающееся» при такой массе время.

Многие черты ψ-частицы находят объяснение, если рассматривать ее как комбинацию из *c*-кварка и его антикварка. Такая система обладает «скрытым оча-

рованием», поскольку общее очарование = 0. При аннигиляции c и $\tilde{c}$ может, например, образоваться виртуальный фотон, который затем превратится в электрон-позитронную пару. Может протекать и обратная реакция: появление ψ при аннигиляции электрон-позитронной пары. Эти две реакции (распад ψ-частицы на электрон-позитронную пару и порождение ψ при аннигиляции этой пары), кстати, и были использованы при открытии ψ-мезона.

Теория говорит, что в системе c-$\tilde{c}$, распад которой отчасти подавляется из-за наличия скрытого очарования, может быть несколько энергетических уровней, напоминающих атомные. Ведь очарованные кварк и антикварк несут противоположные по знаку электрические заряды, и они должны кружиться около общего центра масс, образуя нечто весьма напоминающее «позитроний» — систему, состоящую из электрона и позитрона; это сходство отразилось даже в созвучном названии «чармоний».

Предсказываемый теорией набор энергетических уровней чармония довольно богат. Энергии этих уровней могут принимать значения 4,4 *Гэв*, 4,1 *Гэв*, 3,9 *Гэв*, 3,7 *Гэв*, 3,55 *Гэв*, 3,5 *Гэв*, 3,4 *Гэв*, 3,1 *Гэв* и 2,8 *Гэв*. Как и в атомах, переходы между различными состояниями должны сопровождаться (конечно, если происходит переход на низший уровень) излучением фотонов; только здесь эти фотоны обладают очень большими энергиями, т. е. являются жесткими γ-квантами.

Различные уровни чармония должны проявляться как мезоны различных масс (в пределах примерно от трех до четырех *Гэв*) и времен распада. Некоторые из таких частиц, и в их числе ψ, были действительно обнаружены. Другие же, равно как и частицы, обладающие явным очарованием (т. е. у которых квантовое число очарование отлично от нуля), пока еще не найдены.

В проводимых теперь исследованиях важное место занимают нейтринные эксперименты. Теория предсказывает, что при падении на нуклон мишени мюонного, скажем, нейтрино, может порождаться отрицательный мюон и два кварка, причем один из них — очарованный, а другой — странный. Распад очарованного кварка приводит к появлению двух лептонов

(μ^+ и ν_μ, или e^+ и ν_e). Кроме того (поскольку при распаде очарованного кварка возникает странный кварк, да, кроме того, второй такой кварк порождается первичным нейтрино), в конечном состоянии должны проявляться две странные частицы. Именно такие реакции, сопровождающиеся появлением двух лептонов (и двух странных частиц), тщательно исследуются в проводимых сейчас в ряде стран нейтринных экспериментах.

Открытие ψ-частицы, а затем и других мезонов, предсказанных теорией чармония, вызвало новый прилив интереса к модели кварков и «хромодинамике». Однако окончательных доказательств правильности этих теоретических построений мы пока не имеем, хотя многое здесь представляется правдоподобным (и красивым!). Нужны новые эксперименты. Нужно дальнейшее развитие теории.

Мы позволим себе в заключение привести «портрет» зачарованного кварка, предложенный Альваро де Рухула на XVIII Международной конференции по физике высоких энергий, состоявшейся в Тбилиси летом 1976 г.



Многого мы еще не знаем. Не можем мы, в частности, четко ответить и на вопрос, поставленный в начале книги: сколько существует фундаментальных типов взаимодействия (хотя еще недавно мы были почти уверены, что таких типов всего четыре).

Заключение,

КОТОРОЕ, ВОПРЕКИ ОБЫКНОВЕНИЮ, НИЧЕГО НЕ ЗАКЛЮЧАЕТ

Я пишу без фальши,
Правду сочиняю,
Что случилось дальше,
Я сама не знаю.

М. Архангельский,
«Литературные пародии»



Величественная и гармоническая картина взаимодействий рисуется исследователю. Основные типы сил дают ключ к пониманию бесконечно разнообразных процессов. Они очень непохожи друг на друга, эти фундаментальные виды взаимодействия — и в то же время их связывают узы глубокого единства.

Непохожи. Да, действительно, велико отличие гравитационных, скажем, сил от ядерных. Даже сферы их действия резко отличаются друг от друга. Эти «сферы влияния» можно, как кажется на первый взгляд, очень отчетливо очертить для каждого типа сил. Гравитационные силы господствуют в мире космических объектов. Сфера, где основными становятся электромагнитные силы,— атомы, молекулы и куски вещества, которые из них слагаются. Область, где действуют ядерные силы, еще теснее: ядра атомов. И, наконец, о слабых взаимодействиях больше, чем о любом другом типе сил, хочется сказать, что они определяют процессы, протекающие в интимной сфере самих частиц, из которых складывается все вещество, в том числе и атомные ядра.

Итак, первая, самая грубая классификация сил по сферам их действия выглядит так:

КОСМОС — АТОМ — ЯДРО — ЧАСТИЦА.

Второй признак — величина сил, или, более точно, энергий, соответствующих разным взаимодействиям. Ядерное взаимодействие примерно в сто раз превосходит электромагнитное и в 100 000 миллиардов — «слабое». Гравитационное же взаимодействие двух электронов меньше кулоновского во столько раз, что нам пришлось бы писать число с сорока двумя нулями.

Можно было бы многое добавить к рассказу о том, в чем несхожи фундаментальные силы. Но сколько бы мы ни говорили об их различии, ничто не может заслонить и другую принципиальную сторону дела — единство всех сил.

Взять хотя бы тот же вопрос о делении «сфер влияния». Так ли уж абсолютно это деление? Разве можно, говоря о космических объектах, например, сбросить со счетов ядерные силы? Или электромаг-

нитные? Или, наконец, слабые взаимодействия? Нет, разумеется, нет! Ведь поступить так — это значит зачеркнуть всю физику звезд.

Или другое. Разве в ядре существенны одни ядерные силы? Опять-таки приходится давать отрицательный ответ. И электромагнитные, и слабые взаимодействия существенно сказываются и здесь. Даже гравитационные силы, «классической ареной действия» которых являются космические объекты, по мнению ряда исследователей могут вторгаться в «микромир» и играть существенную роль в формировании самих частиц.

Следовательно, «разложив по полочкам» основные типы взаимодействия, мы тут же убеждаемся, что «лицо мира» определяется всей их совокупностью, их наслоением и глубоко гармоническим сочетанием.

Мир един. Это относится и к миру взаимодействий. И, наконец, еще одно.

Уже говорилось, что большой интерес вызывают исследования, в которых выдвигается идея единого рассмотрения электромагнитных и слабых взаимодействий. Кто знает, не начало ли это пути, который приведет нас к пониманию различных (и в том числе пока еще не изученных) типов взаимодействий как проявления неких общих законов, управляющих материей. И кто знает, не позволит ли установление этого единства истолковать, например, ядерные и слабые взаимодействия (и вместе с ними и какие-то другие силы, которых мы пока не знаем) как проявление неких общих законов, управляющих материей.

Однако есть еще более привлекательные возможности. Для того чтобы объяснить любой процесс, любое физическое явление, мы должны в принципе знать, как уже упоминалось выше, строение вещества, уравнения движения и силы, причем обнаруживаются определенные черты глубокого единства внутри этих основных элементов физической теории.

Единство в строении вещества прежде всего состоит в том, что весь мир построен из сравнительно небольшого числа элементарных частиц. О единстве сил уже говорилось достаточно. Этому посвящена

книга. Наконец, имеется определенное единство уравнений движения.

Несомненно, что высшей формой единства природы, какую только мы можем себе представить, является объединение (слияние) всех трех основных элементов физической теории. Подобное объединение возможно, и это видно на примере общей теории относительности Эйнштейна. В этой теории уравнения для гравитационного поля одновременно определяют и траекторию движения тела.

В единой квантовой теории поля, попытки построения которой предпринимаются в настоящее время, в основе лежит уравнение движения нового типа. Это уравнение записывается для единого поля (материи), возможными формами существования которого являются различные элементарные частицы.

Что же мы можем сказать сейчас о том, какова эта единая «праматерия», как ее порой называют. Казалось бы, ничего определенного,— ведь мы даже не имеем уверенности в том, что она вообще существует. Однако если поверить в то, что «праматерия» — реальность, то о некоторых ее свойствах можно догадываться уже сейчас. Прежде всего это должно быть поле полуцелого спина (конкретно принимается спин $^1/_2$). Почему? Да ведь нам хочется верить, что все наблюдаемые нами частицы — это различные состояния возбуждения «праматерии», различные ее проявления. Но ведь у некоторых известных частиц спин равен 0, у других $^1/_2$, у третьих 1 и т. д. Из чего можно составить эти нули, единицы, половинки и т. д.? Только из половинок. Потому-то «праполю» естественно приписать именно такой спин.

Далее, чтобы «праматерия» могла конденсироваться (если позволить себе этот образный термин) в элементарные частицы, необходимо, чтобы она каким-либо образом сама с собой взаимодействовала (ведь кроме как с самой собой ей взаимодействовать не с чем — кроме нее, согласно основной идее, ничего не существует). Это накладывает определенные условия на уравнения, которые описывают такую материю: эти уравнения, говоря языком математиков, должны быть нелинейными.

Уравнения для «праматерии» с самого начала записываются в виде нелинейных. К этому добавляется еще ряд требований, связанных с так называемыми симметриями (но мы не будем здесь говорить об этом подробнее), которые должны определить вид уравнения для «праматерии».

По идее это уравнение должно определять, какие именно элементарные частицы могут существовать в природе, давать спектр масс элементарных частиц, причем уравнение должно описывать сразу взаимодействующие частицы. Не взаимодействующих ни с чем частиц в теории быть не должно, как нет их в реальной действительности.

Эта обширная программа, развиваемая усилиями большого числа ученых, одно время, казалось, уже привела к определенным достижениям. Но впоследствии выяснилось, что говорить о решающем успехе еще рано. Предпринимаются попытки изменить вид теории. Так, вместо одного «праполя» вводят порой несколько отличающихся по природе, но взаимодействующих друг с другом, и т. д.

Читателю, возможно, придет здесь на память кварковая модель. Действительно, почему бы не сопоставить фундаментальным типам полей эти «пра-частицы»?

Точки соприкосновения здесь, действительно, имеются, но есть и существенные различия.

Модель кварков в первую очередь касается вопроса о том, из чего состоят частицы. Состав — вот что здесь на первом плане. И лишь на втором — вопрос о взаимодействии кварков, о законах их движения — короче, о динамике.

После недавнего открытия ψ-частиц положение еще более осложнилось. Чтобы объяснить их значительную (более трех протонных) массу и, в то же время, аномально большое время жизни, более чем в десять раз превышающее «положенное» для резонансов, пришлось внести в теорию значительные изменения, о которых мы говорили в предыдущей главе. И здесь проблемы динамического описания остаются пока еще нерешенными.

В нелинейной теории динамика является основой. Исходное уравнение, описывающее «праматe-

рию», представляет собой именно концентрированное выражение как законов движения, так и неразрывно спаянных с ними в этой теории законов взаимодействия. Наглядная, модельная сторона перестает здесь играть ведущую роль. Если в этой теории и появится возможность наглядного истолкования в духе моделей, то в конечном итоге это следует рассматривать как нечто, обусловленное динамикой.

Возможно, на каком-то высшем этапе оба подхода, модельный и динамический, сомкнутся. Пока об этом говорить еще рано.

Программа единой теории поля привлекательна со многих точек зрения, хотя бесспорного успеха здесь никто не может гарантировать. В науке никакие гарантии невозможны.

Если построение единой теории поля в какой-либо форме будет осуществлено, то книга о силах природы будет выглядеть совершенно иначе, чем сейчас. Как именно — об этом можно только догадываться.

По мнению ряда исследователей, построение новой теории потребует существенного пересмотра многих фундаментальных положений, в частности, взглядов на пространство и время.

В главе о гравитационных силах мы рассказывали о том, как изменение динамики повлекло за собой пересмотр физической геометрии. Когда стало очевидным, что электромагнитное поле описывается иными законами, чем «механическая» материя, пришлось заново проанализировать вопрос, в какой мере правомерны представления Ньютона о пространстве и времени. Этот анализ, как вы уже знаете, завершился созданием новой геометрии — геометрии теории относительности.

Казалось бы, следующий важный шаг — переход от классической теории к квантовой — должен был бы ознаменоваться новыми взглядами на пространство и время. Однако ничего подобного не произошло. Геометрия квантовой теории осталась сугубо классической. Более того, неквантовая по своему происхождению и существу теория относительности играла и продолжает играть в квантовой теории важнейшую роль; достаточно хотя бы вспомнить, что

уже самые первые шаги в «релятивизации» квантовой механики позволили понять природу античастиц. Квантовая теория сегодня — это существенно релятивистская теория.

Что же в таком случае может оправдать поиски новой геометрии?

Дело в том, что как ни велики успехи квантовой релятивистской теории, в ней есть и серьезные трудности. Их аналог появляется уже в классической электродинамике. Если считать заряженные частицы точечными, то энергия кулоновского поля таких частиц оказывается бесконечно большой. Казалось бы, от этой бесконечности (или, как еще принято говорить, расходимости) легко избавиться, отказавшись от утверждения, будто частицы являются точечными. Однако построить теорию протяженной частицы так, чтобы были выполнены требования теории относительности и в то же время, чтобы движение этой частицы соответствовало обычным представлениям о причинности, т. е. чтобы на состояние в настоящем влияло лишь прошлое, оказалось не просто: эта программа, как выяснилось, наталкивается на принципиальные трудности. В квантовой теории положение еще сложнее. Именно это и толкает на поиски каких-то общих методов решения проблемы. Может быть, один из этих методов — пересмотр геометрии «в малом», т. е. на сверхмалых расстояниях и для сверхмалых промежутков времени.

Может быть. О том, какой будет новая теория, сегодня можно только спорить. И искать.

Очевидно только одно: эта теория позволит нам еще лучше понять природу.

«Мы сообщаем о новых открытиях не для того, чтобы посеять смуту в умах, а чтобы просветить их, не для того, чтобы разрушить науку, а чтобы поистине обосновать ее». Это сказал Галилей три с половиной столетия назад. Ему же принадлежат слова: «Здесь скрыты столь глубокие тайны и столь возвышенные мысли, что, несмотря на старания сотен остроумнейших мыслителей, трудившихся в течение тысяч лет, еще не удалось проникнуть в них и радость творческих исканий и открытий все еще продолжает существовать». Эти слова нимало не устарели.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава четвертая

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИЛЫ В ДЕЙСТВИИ

Глава пятая

ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Глава шестая

СЛАБЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Глава седьмая

«?»-СИЛЫ И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Владимир Иванович Григорьев,
Геннадий Яковлевич Мякишев

СИЛЫ В ПРИРОДЕ

М., 1977 г., 416 стр. с илл.

Редактор *В. Я. Дубнова*

Художники *Е. В. Григорьева,*
Н. Г. Гольц, В. И. Григорьев

Техн. редактор *И. Ш. Аксельрод*

Корректор *Т. С. Вайсберг*

Сдано в набор 5/X 1976 г. Подписано к печати 15/II 1977 г. Бумага $84\times108^1/_{32}$. Физ. печ. л. 13. Условн. печ. л. 21,84. Уч.-изд. л. 21,35. Тираж 100 000 экз. Т-03463. Цена книги 71 к. Заказ № 775

Издательство «Наука»
Главная редакция
физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский
проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного
Знамени Первая Образцовая
типография имени А. А. Жданова
Союзполиграфпрома
при Государственном комитете
Совета Министров СССР
по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-54, Валовая, 28

Цена 71 коп.

